VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

Глава первая. **Общие сведения об измерениях** 7

1-1. Понятие об измерении, виды и методы измерений 7
1-2. Общие сведения о средствах измерений 9
1-3. Общие сведения о точности измерений и погрешности измерений 13
1-4. Оценка и учет погрешностей при точных измерениях 16
1-5. Основные сведения о метрологических характеристиках средств измерений 30
1-6. Общие сведения о динамических характеристиках средств измерений 43
1-7. Оценка и учет погрешностей при технических измерениях 52

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ
ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Глава вторая. **Общие сведения об измерении температур** 56

2-1. Основные сведения о температуре и температурных шкалах 56
2-2. Практические температурные шкалы 61

Глава третья. **Термометры, основанные на расширении и изменении давления рабочего вещества** 65

3-1. Термометры стеклянные жидкостные 65
3-2. Термометры манометрические 75
3-3. Дилатометрические и биметаллические термометры 84

Глава четвертая. **Термоэлектрический метод измерения температур** 86

4-1. Общие сведения 86
4-2. Основы теории термоэлектрических термометров 87
4-3. Включение измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра 93
4-4. Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического термометра 95
4-5. Определение термо-э. д. с. различных материалов при изучении их термоэлектрических свойств 96
4-6. Основные требования, предъявляемые к термоэлектродным материалам 98
4-7. Общие сведения о термоэлектрических термометрах 99

4-8. Устройство термоэлектрических термометров 110
4-9. Удлиняющие термоэлектродные провода 116
4-10. Устройства для обеспечения постоянства температуры свободных концов термоэлектрических термометров 119
4-11. Милливольтметры 120
4-12. Устройство КТ и схемы присоединения нескольких термоэлектрических термометров к одному милливольтметру 135
4-13. Измерение термо-э. д. с. милливольтметром 139
4-14. Компенсационный метод измерения термо-э. д. с. 143
4-15. Нормальные элементы 144
4-16. Потенциометры переносные и лабораторные 146
4-17. Общие сведения об автоматических потенциометрах 152
4-18. Принципиальные схемы автоматических потенциометров 160
4-19. Методика расчета сопротивлений резисторов измерительной схемы автоматических потенциометров 165
4-20. Основные сведения об усилителях 171
4-21. Основные сведения об источниках стабилизированного питания 177
4-22. Устройство автоматических потенциометров 178
4-23. Автоматические безреохордные потенциометры 186

Глава пятая. **Термометры сопротивления и измерительные приборы к ним** 188

5-1. Общие сведения 188
5-2. Основные сведения о термометрах сопротивления и металлах, применяемых для их изготовления 190
5-3. Устройство платиновых и медных термометров сопротивления 197
5-4. Полупроводниковые термометры сопротивления 203
5-5. Компенсационный метод измерения сопротивления термометра 208
5-6. Измерение сопротивления термометра мостом 209
5-7. Логометры 213
5-8. Общие сведения об автоматических уравновешенных мостах . . . 221
5-9. Принципиальные измерительные схемы автоматических уравновешенных мостов 222
5-10. Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста 224
5-11. Устройство автоматических уравновешенных мостов 226
5-12. Автоматические компенсационные приборы для работы с малоомными термометрами сопротивления 229

Глава шестая. **Методика измерения температуры контактными методами, погрешности при измерении и способы их учета и уменьшения** 231

6-1. Общие методические указания 231
6-2. Методические погрешности при измерении температур газа, обусловленные влиянием теплообмена излучением 234
6-3. Методические погрешности при измерении температуры среды, обусловленные отводом или подводом тепла по термоприемнику 238
6-4. Установка термоприемников при измерении температуры газов, пара и жидкостей 245
6-5. Измерение температуры газовых потоков большой скорости . . . 250
6-6. Измерение температуры поверхности и внутри тела 255

Глава седьмая. **Измерение температуры тел по их тепловому излучению** 260

7-1. Общие сведения 260
7-2. Теоретические основы методов измерения температуры тел по их тепловому излучению 261
7-3. Оптические пирометры 269
7-4. Фотоэлектрические пирометры 280
7-5. Пирометры спектрального отношения 284
7-6. Пирометры полного излучения 288

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОКАЗАНИЙ

Глава восьмая. **Измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи показаний** 298
- 8-1. Общие сведения 298
- 8-2. Реостатные измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи 299
- 8-3. Измерительные тензопреобразователи 302
- 8-4. Дифференциально-трансформаторные преобразователи и схемы дистанционной передачи 305
- 8-5. Ферродинамические преобразователи и схемы дистанционной передачи 314
- 8-6. Механоэлектрические передающие преобразователи 319
- 8-7. Передающие преобразователи с магнитной компенсацией 321
- 8-8. Электросиловые преобразователи 325
- 8-9. Частотные преобразователи со струнным вибратором 329
- 8-10. Пневмосиловые преобразователи 332
- 8-11. Пневматические передающие преобразователи 335
- 8-12. Электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи 338
- 8-13. Нормирующие измерительные преобразователи 341

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

Общие сведения и единицы давления 347

Глава девятая. **Жидкостные приборы давления с видимым уровнем** 349
- 9-1. Приборы U-образные и чашечные 349
- 9-2. Микроманометры 353
- 9-3. Поправки к показаниям жидкостных приборов 358
- 9-4. Барометры ртутные 359

Глава десятая. **Приборы давления с упругими чувствительными элементами** 361
- 10-1. Общие сведения и основные свойства упругих чувствительных элементов 361
- 10-2. Упругие чувствительные элементы 365
- 10-3. Приборы давления прямого действия 374
- 10-4. Электроконтактные приборы и реле давления 381
- 10-5. Приборы давления с электрическими и пневматическими преобразователями 382

Глава одиннадцатая. **Приборы давления электрические** . . . 390
- 11-1. Пьезоэлектрические манометры 390
- 11-2. Манометры сопротивления 393

Глава двенадцатая. **Дифференциальные манометры** 394
- 12-1. Общие сведения 394
- 12-2. Дифманометры колокольные 396
- 12-3. Дифманометры кольцевые 401
- 12-4. Дифманометры поплавковые 404
- 12-5. Дифманометры с упругими чувствительными элементами 409

Глава тринадцатая. **Основные сведения о методике измерения давления** 424
- 13-1. Общие методические указания 424
- 13-2. Измерение близкого к атмосферному давления газовых сред . . . 425
- 13-3. Измерение давления газов, жидкостей и пара 428
- 13-4. Разделители жидкостные и мембранные 431

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗА, ПАРА И ТЕПЛА

Основные понятия и единицы расхода и количества вещества 433

Глава четырнадцатая. **Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве** 434

14-1. Основы теории и уравнения расхода 434
14-2. Стандартные сужающие устройства 440
14-3. Коэффициенты расхода и поправочные множители к ним 447
14-4. Поправочный множитель на расширение измеряемой среды . . . 456
14-5. Определение плотности измеряемой среды 458
14-6. Основные расчетные формулы расхода 460
14-7. Методические указания по измерению расхода жидкостей, газов и пара расходомерами с сужающим устройством 462
14-8. Погрешности измерения расхода 474
14-9. Основные сведения о методике расчета сужающих устройств . . . 482
14-10. Измерение расхода на входе в трубопровод или на выходе из него 487
14-11. Измерение расхода при малых числах Рейнольдса 489
14-12. Измерение расхода загрязненных жидкостей и газов 494
14-13. Измерение расхода при сверхкритическом отношении давлений 496

Глава пятнадцатая. **Измерение скоростей и расхода жидкостей и газов напорными трубками** 498

15-1. Общие сведения о методе измерения скоростей потока 498
15-2. Устройство напорных трубок 500
15-3. Определение средней скорости потока и расхода 502

Глава шестнадцатая. **Расходомеры постоянного перепада давления** 503

16-1. Общие сведения 503
16-2. Основы теории ротаметров 505
16-3. Устройство ротаметров 508

Глава семнадцатая. **Тахометрические расходомеры и счетчики количества и электромагнитные расходомеры** 509

17-1. Тахометрические счетчики количества жидкостей 509
17-2. Тахометрические расходомеры жидкостей 516
17-3. Электромагнитные расходомеры 520

Глава восемнадцатая. **Измерение количества и расхода тепла в теплофикационных системах** 526

18-1. Общие сведения 526
18-2. Основные сведения об устройстве тепломеров 527

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ И СЫПУЧИХ ТЕЛ

Глава девятнадцатая. **Измерение уровня жидкостей** 530

19-1. Общие сведения 530
19-2. Измерение уровня воды в барабане парогенераторов 531
19-3. Измерение уровня жидкостей в конденсаторах, подогревателях и баках с помощью дифманометров 544
19-4. Измерение уровня жидкостей с помощью поплавковых и буйковых уровнемеров 548
19-5. Емкостные уровнемеры 550
19-6. Акустические и ультразвуковые уровнемеры 561

Глава двадцатая. **Измерение уровня сыпучих тел** 564
20-1. Общие сведения 564
20-2. Сигнализаторы уровня сыпучих тел 566
20-3. Приборы для измерения уровня сыпучих тел 569

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВА ГАЗОВ

Глава двадцать первая. **Методы и средства измерений состава газов** 572
21-1. Общие сведения 572
21-2. Газоанализаторы химические 574
21-3. Тепловые газоанализаторы 576
21-4. Магнитные газоанализаторы 586
21-5. Оптические газоанализаторы 598
21-6. Газовые хроматографы 605
21-7. Методические указания по отбору проб газа для анализа 618

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ
МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ПАРА, КОНДЕНСАТА И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ

Глава двадцать вторая. **Методы и технические средства контроля качества воды, пара, конденсата и концентрации растворов** . . . 622
22-1. Общие сведения 622
22-2. Измерение удельной электропроводности водных растворов . . . 623
22-3. Кондуктометры жидкости с дегазацией и обогащением пробы 636
22-4. Безэлектродные кондуктометрические анализаторы жидкости 636
22-5. Анализаторы для определения растворенного в воде кислорода 639
22-6. Анализаторы для определения растворенного в воде и паре водорода 643
Приложения 647
Список литературы 691
Предметный указатель 696

31.32
П72
УДК [621.1.016.4 : 536—5.08] (075.8)

Преображенский В. П.

П72 Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». — 3-е изд., перераб. — М.: «Энергия», 1978. — 704 с., ил.

В книге рассматриваются основные методы и средства измерений, применяемые для автоматизации теплоэнергетических процессов. Освещается методика измерения температуры, давления, расхода и других величин. Рассматриваются погрешности измерения, способы их уменьшения, преимущества и недостатки отдельных методов и средств измерений. Излагаемый в книге материал сопровождается примерами расчетов. Второе издание вышло в свет в 1953 г. Третье издание полностью переработано.

Книга является учебником по курсу «Теплотехнические измерения и приборы» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов».

П $\frac{30302\text{-}017}{051(01)\text{-}78}$ 4-78

31.32
6П2.22

© Издательство «Энергия», 1978

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

1-1. Понятие об измерении, виды и методы измерений

Измерением называется процесс получения опытным путем числового соотношения между измеряемой величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения.

Число, выражающее отношение измеряемой величины к единице измерения, называется числовым значением измеряемой величины; оно может быть целым или дробным, но является отвлеченным числом. Значение величины, принятое за единицу измерения, называется размером этой единицы.

Если x — измеряемая величина, u — единица измерения, A — числовое значение измеряемой величины в принятой единице, то результат измерения величины x может быть представлен следующим равенством:

$$x = Au. \qquad (1\text{-}1\text{-}1)$$

Уравнение (1-1-1) называют основным уравнением измерения. Из этого уравнения следует, что значение A зависит от размера выбранной единицы измерения u. Чем меньше выбранная единица, тем больше для данной измеряемой величины будет числовое значение. Результат всякого измерения является именованным числом. Вследствие этого для определенности написания результата измерения рядом с числовым значением измеряемой величины ставится сокращенное обозначение принятой единицы.

Если при измерении величины x вместо единицы u взять другую единицу u_1, то выражение (1-1-1) примет вид:

$$x = A_1 u_1.$$

Учитывая уравнение (1-1-1), получаем:

$$Au = A_1 u_1,$$

или

$$A_1 = A \frac{u}{u_1}.$$

Из этой формулы следует, что для перехода от результата измерения A, выраженного в одной единице u, к результату A_1, выраженному в другой единице u_1, необходимо A умножить на отношение принятых единиц.

При выборе единиц измерения необходимо учитывать фактор «удобства» — результат измерений по возможности должен выражаться «удобным» числом: не слишком большим и не слишком малым.

Если единица измерения представлена в виде конкретного образца, называемого мерой, то процесс измерения сводится к непосредственному сравнению измеряемой величины с мерой, как материальным выражением единицы измерения.

В тех же случаях, когда непосредственное сравнение невозможно или трудно осуществить, измеряемая величина преобразуется в некоторую другую физическую величину, однозначно связанную с измеряемой и более удобную для измерения. Например, измерение температуры жидкостно-стеклянным термометром (§ 3-1) сводится к определению длины жидкостного столбика, выраженной в делениях шкалы, а измерение температуры с помощью термометра сопротивления (§ 5-1) к определению электрического сопротивления и т. п.

По способу получения числового значения искомой величины измерения можно разделить на два вида: прямые и косвенные.

К прямым измерениям относятся те, результат которых получается непосредственно из опытных данных. При этом значение искомой величины получается либо путем непосредственного сравнения ее с мерами, либо посредством измерительных приборов, градуированных в соответствующих единицах.

При прямых измерениях результат выражается непосредственно в тех же единицах, что и измеряемая величина. Измеряемая величина x и результат ее непосредственного измерения z связаны простым соотношением

$$x = z. \qquad (1\text{-}1\text{-}2)$$

Прямые измерения являются весьма распространенным видом технических измерений. К ним относятся измерения длины — метром, температуры — термометром, давления — манометром и т. п.

К косвенным измерениям относятся те, результат которых получается на основании прямых измерений нескольких других величин, связанных с искомой величиной определенной зависимостью.

В общем виде искомая величина y может быть определена некоторой функциональной зависимостью

$$y = f(x_1, \ x_2, \ x_3 \ldots), \qquad (1\text{-}1\text{-}3)$$

где x_1, x_2... — значения величин, измеряемых прямым способом.

К косвенным измерениям относится определение расхода жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве (гл. 14) и т. п.

Косвенные измерения применяются в технике и научных исследованиях в тех случаях, когда искомую величину невозможно или сложно измерить непосредственно путем прямого измерения или когда косвенное измерение позволяет получить более точные результаты.

В метрологической практике кроме рассмотренных видов измерений применяют совокупные и совместные виды измерения [6].

В зависимости от назначения и от предъявляемой к ним точности измерения делятся на лабораторные (точные) и технические. Способы оценки точности лабораторных и технических измерений будут рассмотрены ниже.

Под принципом измерения понимается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, например измерение температуры с использованием термоэлектрического эффекта (гл. 4), измерение расхода жидкостей по перепаду давления в сужающем устройстве (гл. 14). Под методом измерений понимается совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Процесс измерения, способы проведения его и средства измерений, при помощи которых он осуществляется, зависят от измеряемой величины, существующих методов и условий измерения. При выполнении теплотехнических измерений широко применяют метод непосредственной оценки, метод сравнения с мерой и нулевой метод.

Под методом непосредственной оценки понимается метод измерения, в котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, например измерение давления манометром (гл. 10), измерение температуры термометром (гл. 3) и т. п. Он является самым распространенным, особенно в промышленных условиях.

Метод сравнения с мерой — метод, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной воспроизводимой меры, например измерение э. д. с. термоэлектрического термометра (гл. 4) или напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с э. д. с. нормального элемента. Его часто называют компенсационным.

Нулевым называется метод, при котором эффект действия измеряемой величины полностью уравновешивается эффектом известной величины, так что в результате их взаимное действие сводится к нулю. Применяемый при этом прибор служит только для установления факта достижения уравновешивания и в этот момент показание прибора становится равным нулю. Прибор, применяемый при нулевом методе, сам по себе ничего не измеряет и поэтому его обычно называют нулевым. Нулевой метод обладает высокой точностью измерения. Нулевые приборы, применяемые для осуществления данного метода, должны обладать высокой чувствительностью. Понятие точность к нулевым приборам неприложимо. Точность же результата измерения, производимого по нулевому методу, определяется в основном точностью применяемой образцовой меры и чувствительностью нулевого прибора.

1-2. Общие сведения о средствах измерений

Средствами измерений называют технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики — характеристики свойств средств измере-

ний, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений.

Основными видами средств измерений являются меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и измерительные устройства.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Например, гиря есть мера массы; измерительный резистор — мера электрического сопротивления; температурная лампа — мера яркостной или цветовой температуры (гл. 7).

Измерительным прибором называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины, называют аналоговым измерительным прибором. Если показания прибора, автоматически вырабатывающего дискретные сигналы измерительной информации, представлены в цифровой форме, прибор называют цифровым.

Показывающим измерительным прибором называют прибор, допускающий только отсчитывание показаний. Если в измерительном приборе предусмотрена регистрация показаний, то его называют регистрирующим.

Самопишущим измерительным прибором называют регистрирующий прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы. Регистрирующий прибор, в котором предусмотрено печатание показаний в цифровой форме, называют печатающим.

Измерительным прибором прямого действия называют прибор, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т. е. без применения обратной связи, например, показывающий манометр, ртутно-стеклянный термометр.

Измерительный прибор, в котором подводимая величина подвергается интегрированию по времени или по другой независимой переменной, называют интегрирующим измерительным прибором.

Измерительным преобразователем называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительные преобразователи в зависимости от их назначения и функций могут быть подразделены на первичные, промежуточные, передающие, масштабные и другие.

Первичным преобразователем называют измерительный преобразователь, к которому подведена измеряемая величина, т. е. первый в измерительной цепи. В качестве примера можно привести термоэлектрический термометр (гл. 4), термометр сопротивления (гл. 5), сужающее устройство расходомера (гл. 14). Измерительный преобра-

зователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного, называют промежуточным.

Передающим измерительным преобразователем называют измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации (гл. 8).

Масштабным измерительным преобразователем называют измерительный преобразователь, предназначенный для изменения величины в заданное число раз, например, измерительный трансформатор тока, делитель напряжения, измерительный усилитель и т. п.

Измерительными устройствами называют средства измерений, состоящие из измерительных приборов и измерительных преобразователей. Измерительные устройства в зависимости от их назначения и функций, могут быть подразделены на первичные и промежуточные измерительные устройства (приборы).

Под первичным измерительным устройством (первичным прибором) понимают средство измерений, к которому подведена измеряемая величина. Промежуточным измерительным устройством (промежуточным прибором) называют средство измерений, к которому подведен выходной сигнал первичного преобразователя (например, перепад давления, создаваемый сужающим устройством). Первичные и промежуточные приборы, снабженные передающими преобразователями, могут быть выполнены с отсчетными устройствами или без них.

Вторичными измерительными устройствами (вторичными приборами) называют средства измерений, которые предназначены для работы в комплекте с первичными или промежуточными приборами, а также с некоторыми видами первичных и промежуточных преобразователей.

Кроме рассмотренных средств измерений применяются более сложные измерительные устройства автоматического действия — так называемые измерительные информационные системы. Под такими системами понимаются устройства с автоматическим многоканальным (во многих точках) измерением, а в некоторых случаях и обработкой информации по некоторому заданному алгоритму.

Следует отметить, что одним из важных признаков новых разработок средств измерений и элементов для устройств автоматизации (автоматического контроля, регулирования и управления) является унификация выходных и входных сигналов преобразователей, первичных, промежуточных и вторичных приборов. Унификация выходных и входных сигналов обеспечивает взаимозаменяемость средств измерений, позволяет сократить разновидность вторичных измерительных устройств. Кроме того, унифицированные приборы и элементы существенно повышают надежность действия устройств автоматизации и открывают широкие перспективы применения информационно-вычислительных машин.

В нашей стране создание унифицированных средств измерений реализуется в Государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Эта система строится по блочно-

модульному принципу и делится на три ветви, объединяющие приборы с пневматическим, электрическим постоянного и переменного тока и электрическим частотным выходным и входным сигналами.

Диапазоны изменения унифицированных сигналов в соответствии с Государственными стандартами (ГОСТ 9468-60; ГОСТ 9898-61; ГОСТ 9895-69) установлены следующие: пневматического 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа); электрического — постоянного тока 0—5, 0—20 и 0—100 мА (рекомендуется 0—5 мА) или 0—10 В, переменного тока частотой 50 или 400 Гц (обычно 50 Гц) 1—0—1, 0—2 и 1—3 В; 0—10 мГ, 10—0—10 мГ; электрического частотного 1500—2500 и 4000—8000 Гц.

В зависимости от назначения, а вместе с тем и от той роли, которую выполняют различные средства измерений (меры, измерительные приборы и преобразователи) в процессе измерения, они делятся на три категории:

1) рабочие меры, измерительные приборы и преобразователи;
2) образцовые меры, измерительные приборы и преобразователи;
3) эталоны.

Рабочими средствами измерений называются все меры, приборы и преобразователи, предназначенные для практических повседневных измерений во всех отраслях народного хозяйства. Они подразделяются на средства измерений повышенной точности (лабораторные) и технические.

Образцовыми называются меры, приборы и первичные преобразователи (например, термоэлектрические термометры, термометры сопротивления), предназначенные для поверки и градуировки рабочих мер, измерительных приборов и преобразователей. Верхний предел измерений образцового прибора должен быть равен или более верхнего предела измерений поверяемого прибора. Допускаемая погрешность образцового прибора или измерительного устройства в том случае, когда поправки к его показаниям не учитываются, должна быть значительно меньше (в 4—5 раз) допускаемой погрешности испытуемого прибора [1].

Рабочие меры, измерительные приборы и преобразователи поверяются в институтах мер и измерительных приборов и в контрольных лабораториях системы Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

Образцовые меры, измерительные приборы и первичные преобразователи, предназначенные для поверки рабочих, поверяются в Государственных институтах мер и измерительных приборов и в Государственных контрольных лабораториях 1-го разряда по еще более точным образцовым мерам, приборам и преобразователям, т. е. образцовым средствам измерений более высокого разряда (например, образцовые приборы 2-го разряда поверяются методом сравнения с образцовыми приборами 1-го разряда). Образцовые меры,

---

[1] Необходимая точность образцовых мер приборов и преобразователей, предназначенных для поверки рабочих, устанавливается соответствующими инструкциями Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

приборы и преобразователи высшего в данной области измерения разряда (1-го разряда) поверяются в Государственных институтах мер и измерительных приборов по соответствующим рабочим эталонам.

Меры, измерительные приборы и первичные преобразователи, служащие для воспроизведения и хранения единиц измерения с наивысшей (метрологической) точностью, достижимой при данном уровне науки и техники, а также для поверки мер, приборов и преобразователей высшего разряда, называются эталонами.

Воспроизведение единиц измерения в СССР осуществляется Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ).

Для обеспечения единой системы измерения температуры, давления и т. п. в СССР ВНИИМ передает рабочие эталоны в Государственные институты мер и измерительных приборов.

1-3. Общие сведения о точности измерений и погрешности измерений

При измерении любой величины, как бы тщательно мы ни производили измерение, не представляется возможным получить свободный от искажения результат. Причины этих искажений могут быть различны. Искажения могут быть вызваны несовершенством применяемых методов измерения, средств измерений, непостоянством условий измерения и рядом других причин. Искажения, которые получаются при всяком измерении, обусловливают *погрешность измерения* — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Погрешность измерения может быть выражена в единицах измеряемой величины, т. е. в виде абсолютной погрешности, которая представляет собой разность между значением, полученным при измерении, и истинным значением измеряемой величины. Погрешность измерения может быть выражена также в виде относительной погрешности измерения, представляющей собой отношение к истинному значению измеряемой величины. Строго говоря, истинное значение измеряемой величины всегда остается неизвестным, можно найти лишь приближенную оценку погрешности измерения.

Погрешность результата измерения дает представление о том, какие цифры в числовом значении величины, полученном в результате измерения, являются сомнительными. Округлять числовое значение результата измерения необходимо в соответствии с числовым разрядом значащей цифры погрешности, т. е. числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. При округлении рекомендуется пользоваться правилами приближенных вычислений.

Погрешности измерения в зависимости от характера причин, вызывающих их появление, принято разделять на *случайные*, *систематические* и *грубые*.

Под случайной погрешностью понимают погрешность измерения, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Они вызываются причинами, которые не могут быть определены при измерении и на которые нельзя оказать влияния. Присутствие случайных погрешностей можно обнаружить лишь при повторении измерений одной и той же величины с одинаковой тщательностью. Если при повторении измерений получаются одинаковые числовые значения, то это указывает не на отсутствие случайных погрешностей, а на недостаточную точность и чувствительность метода или средства измерений.

Случайные погрешности измерений непостоянны по значению и по знаку. Они не могут быть определены в отдельности и вызывают неточность результата измерения. Однако с помощью теории вероятностей и методов статистики случайные погрешности измерений могут быть количественно определены и охарактеризованы в их совокупности, причем тем надежнее, чем больше число проведенных наблюдений.

Под систематической погрешностью понимают погрешность измерения, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины. Если систематические погрешности известны, т. е. имеют определенное значение и определенный знак, они могут быть исключены путем внесения поправок.

Поправкой называют значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности. Отметим, что поправку, вводимую в показания измерительного прибора, называют поправкой к показанию прибора; поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют поправкой к значению меры. В некоторых случаях пользуются поправочным множителем, под последним понимают число, на которое умножают результат измерения с целью исключения систематической погрешности. Обычно различают следующие разновидности систематических погрешностей: инструментальные, метода измерений, субъективные, установки, методические.

Под инструментальными погрешностями понимают погрешности измерения, зависящие от погрешностей применяемых средств измерений. При применении средств измерений повышенной точности инструментальные погрешности, вызываемые несовершенством средств измерений, могут быть исключены путем введения поправок. Инструментальные погрешности технических средств измерений не могут быть исключены, так как эти средства измерений при их поверке поправками не снабжаются.

Под погрешностью метода измерений понимают погрешность, происходящую от несовершенства метода измерений. Она возникает сравнительно часто при применении новых методов, а также при применении аппроксимирующих уравнений, представляющих иногда неточное приближение к действительной зависимости величин

друг от друга. Погрешность метода измерений должна учитываться при оценке погрешности средства измерений и, в частности, измерительной установки, а иногда и погрешности результата измерений.

Субъективные погрешности (имеющие место при неавтоматических измерениях) вызываются индивидуальными особенностями наблюдателя, например запаздывание или опережение в регистрации момента какого-либо сигнала, неправильная интерполяция при отсчитывании показаний в пределах одного деления шкалы, от параллакса и т. п. Под погрешностью от параллакса понимают составляющую погрешности отсчитывания, происходящую вследствие визирования стрелки, расположенной на некотором расстоянии от поверхности шкалы, в направлении, не перпендикулярном поверхности шкалы.

Погрешности установки возникают вследствие неправильной установки стрелки измерительного прибора на начальную отметку шкалы или небрежной установки средства измерений, например не по отвесу или уровню и т. п.

Методические погрешности измерений представляют собой такие погрешности, которые определяются условиями (или методикой) измерения величины (давления, температуры и т. д. данного объекта) и не зависят от точности применяемых средств измерений. Методическая погрешность может быть вызвана, например, добавочным давлением столба жидкости в соединительной линии, если прибор, измеряющий давление, будет установлен ниже или выше места отбора давления, а при измерении температуры термоэлектрическим термометром в комплекте с измерительным прибором (гл. 4) — условиями теплообмена со средой, температура которой измеряется, или нарушением термоэлектрическим термометром температурного поля объекта в процессе измерения (гл. 6).

При выполнении измерений, особенно точных, необходимо иметь в виду, что систематические погрешности могут значительно исказить результаты измерения. Поэтому прежде чем приступить к измерению, необходимо выяснить все возможные источники систематических погрешностей и принять меры к их исключению или определению. Однако дать исчерпывающие правила для отыскания и исключения систематических погрешностей практически невозможно, так как слишком разнообразны приемы измерения различных величин. Кроме того, при неавтоматических измерениях многое зависит от знаний и опыта экспериментатора. Ниже приведем некоторые общие приемы исключения и выявления систематических погрешностей.

Для выявления возможных изменений инструментальных погрешностей вследствие тех или иных неисправностей применяемых средств измерений или их износа и других причин все они должны подвергаться регулярной поверке.

Для исключения погрешностей установки как при точных, так и при технических измерениях необходима тщательная и правильная установка средств измерений. Если же причиной погрешности являются внешние возмущения (температура, движение воз-

духа, вибрация и т. п.), то их влияние должно быть устранено или учтено. Применяют также ряд специальных способов исключения методических и других погрешностей, которые будут рассмотрены ниже.

Под грубой погрешностью измерения понимается погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях (§ 1-4).

При измерении переменной во времени величины результат измерения может оказаться искаженным помимо погрешностей, рассмотренных выше, погрешностью еще одного вида, возникающей только в динамическом режиме и получившей вследствие этого наименование динамической погрешности средства измерений. При измерении переменной во времени величины динамическая погрешность может возникнуть вследствие неправильного выбора средства измерений или несоответствия измерительного прибора условиям измерения. При выборе средства измерений необходимо знать динамические свойства его, а также закон изменения измеряемой величины (§ 1-6).

Выше было сказано, что в зависимости от назначения и требований, предъявляемых к точности измерений, измерения делятся на точные (лабораторные) и технические. Измерения точные, как правило, выполняются многократно повторяемыми и с помощью средств измерений повышенной точности. Путем повторения измерений влияние на их итог случайных погрешностей можно ослабить, а следовательно, повысить точность измерения. При этом необходимо иметь в виду, что даже при благоприятных условиях точность измерения не может быть выше точности поверки применяемых средств измерений.

При выполнении технических измерений, широко применяемых в промышленности, а иногда и в лабораторных условиях, используют рабочие средства измерений, которые поправками при их поверке не снабжаются.

1-4. Оценка и учет погрешностей при точных измерениях

При выполнении точных измерений пользуются средствами измерений повышенной точности, а вместе с тем применяют и более совершенные методы измерения. Однако, несмотря на это, вследствие неизбежного наличия во всяком измерении случайных погрешностей истинное значение измеряемой величины остается неизвестным и вместо него мы принимаем некоторое среднее арифметическое значение, относительно которого при большом числе измерений, как показывает теория вероятностей и математическая статистика, у нас есть обоснованная уверенность считать, что оно является наилучшим приближением к истинному значению [1].

[1] В математической статистике и теории вероятностей среднее значение величины при неограниченно большом числе отдельных наблюдений называют математическим ожиданием.

Обычно, кроме случайных погрешностей, на точность измерения могут влиять систематические погрешности. Измерения должны проводиться так, чтобы систематических погрешностей не было. В дальнейшем при применении предложений и выводов, вытекающих из теории погрешностей, и обработке результатов наблюдения будем полагать, что ряды измерений не содержат систематических погрешностей, а также из них исключены грубые погрешности.

Теория случайных погрешностей, а вместе с тем и суждение о закономерностях, которым подчиняются случайные погрешности, основывается на двух аксиомах, базирующихся на опытных данных [2].

Аксиома случайности. При очень большом числе измерений случайные погрешности, равные по величине, но различные по знаку, встречаются одинаково часто, т. е. число отрицательных погрешностей равно числу положительных.

Аксиома распределения. Малые погрешности случаются чаще, чем большие. Очень большие погрешности не встречаются.

Пусть неизвестное истинное значение некоторой неизменной величины есть X. При измерении этой величины получено n независимых друг от друга результатов наблюдений $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$. Измерения выполнены одним и тем же прибором и с одинаковой тщательностью, т. е. одинаково точными и свободными от систематической погрешности. Предположим, что каждому измерению сопутствует случайная погрешность $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n$ — различная по значению и по знаку. Следовательно, для каждого результата наблюдений можно написать выражение вида $\delta_i = x_i - X$ и затем получить совокупность уравнений для ряда измерений:

$$\left.\begin{array}{l} \delta_1 = x_1 - X; \\ \delta_2 = x_2 - X; \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \delta_n = x_n - X \\ \hline \sum\limits_{i=1}^{n} \delta_i = \sum\limits_{i=1}^{n} x_i - nX \end{array}\right\} \qquad (1\text{-}4\text{-}1)$$

Предположим, что в выполненных измерениях число, сумма и числовые значения положительных случайных погрешностей приблизительно равны числу, сумме и значениям отрицательных погрешностей. Другими словами, распределение случайных погрешностей — равностороннее по отношению к среднему значению измерений $\bar{X}$.

Таким образом, по предположению,

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i = 0, \qquad (1\text{-}4\text{-}2)$$

и потому

$$X \approx \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i. \qquad (1\text{-}4\text{-}3)$$

Это равенство позволяет считать, что среднее арифметическое значение $\bar{X}$ (или математическое ожидание M) является наиболее близким к истинному значению измеряемой величины X, какое только можно получить из имеющихся опытных данных. Сделанное допущение о справедливости (1-4-2) и приводит к справедливости выражения (1-4-3).

После того как найдено среднее значение $\bar{X}$ (1-4-3) для ряда наблюдений $x_1, x_2, \ldots, x_n$, для изучения погрешностей необходимо найти случайные отклонения v_i каждого результата наблюдения от среднего значения $\bar{X}$:

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= x_1 - \bar{X}; \\ v_2 &= x_2 - \bar{X}; \\ &\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots \\ v_n &= x_n - \bar{X}. \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}4\text{-}4)$$

В соответствии с аксиомой случайности

$$\sum_{i=1}^{n} v_i \approx 0.$$

Выше отмечалось, что отклонения в измерениях или погрешности являются случайными, т. е. значение (размер) их для каждого отдельного измерения нельзя предвидеть. Поэтому представляется естественным применять к ним те общие законы для случайных явлений (или величин), которые рассматриваются в теории вероятностей и математической статистике [1].

Закон нормального распределения случайных погрешностей выражается следующим уравнением:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_n^2}}, \qquad (1\text{-}4\text{-}5)$$

где $f(\delta)$ — плотность распределения вероятностей; σ_n — среднее квадратическое отклонение результата наблюдения при большом числе измерений ($n \to \infty$); e — основание натуральных логарифмов; $e = 2{,}7183$.

На рис. 1-4-1 закон распределения случайных погрешностей, выражаемый уравнением (1-4-5), представлен в виде симметричной

---

[1] Лиц, интересующихся более подробными сведениями о теории погрешностей, отсылаем к специальным пособиям [1—4,7].

кривой, которую называют кривой нормального (гауссовского) распределения случайных погрешностей.

Наблюдения, проведенные при большом числе повторных измерений в одних и тех же условиях, показывают, что для результатов этих наблюдений частота появления тех или иных значений случайных погрешностей подчиняется устойчивым закономерностям. Если через m_i обозначить частоту появлений значения погрешности δ_i при общем их числе n, то отношение m_i/n есть относительная частота появлений значения δ_i. При неограниченно большом числе наблюдений ($n \to \infty$) это отношение равнозначно понятию вероятности, т. е. может рассматриваться как статистическая вероятность ($p_i = m_i/n$) появления погрешности δ_i при повторении измерений в неизменных условиях. Общность понятий частоты и вероятности подробно рассматривается в курсах теории вероятностей.

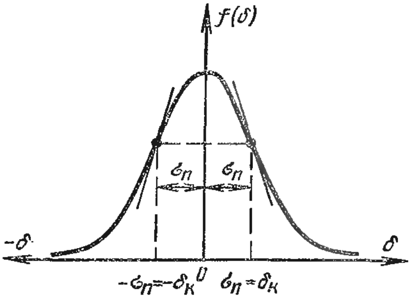


Рис. 1-4-1. Кривая нормального распределения случайных погрешностей.

Вероятность того, что погрешности не превосходят численно некоторого значения $|\delta|$, т. е. лежат в пределах от $-\delta$ до $+\delta$, может быть найдена (учитывая симметричность кривой нормального распределения) путем интегрирования уравнения (1-4-5):

$$P = 2\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_n^2}}\frac{d\delta}{\sigma_n}.$$

Производя замену переменной $\delta/\sigma_n = t$, получаем:

$$P = 2\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{t} e^{-\frac{t^2}{2}}\,dt = \Phi(t).$$

Для функции

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{t} e^{-\frac{t^2}{2}}\,dt, \qquad (1\text{-}4\text{-}6)$$

которую принято называть нормальной функцией распределения, составлены таблицы для различных значений t [1, 2, 4].

Возвращаясь к рис. 1-4-1, найдем точки перегиба кривой и соответствующие им значения $-\delta_k$ и $+\delta_k$. Для этого приравняем вторую производную уравнения (1-4-5) нулю и найдем, что перегиб кривой происходит в двух точках, симметрично расположенных по обе стороны от оси ординат $f(\delta)$, при значениях $\pm\delta_k = \pm\sigma_n$. Полученные точки перегиба разделяют область часто встречающихся случайных погрешностей от области погрешностей, редко встречающихся.

Для неограниченно большого ряда измерений 68,3% всех случайных погрешностей ряда лежит ниже данного значения σ_n и 31,7% выше его.

Параметр σ_n однозначно характеризует форму кривой распределения случайных погрешностей. Ордината $f(\delta)$ кривой распределения, соответствующая $\delta = 0$, обратно пропорциональна σ_n; при увеличении σ_n ордината $f(0)$ уменьшается (рис. 1-4-2). Так как площадь под кривой распределения всегда равна единице, то при увеличении σ_n кривая распределения *3* (рис. 1-4-2) становится более плоской, чем кривая *2*, растягиваясь вдоль оси абсцисс. С другой стороны, при уменьшении σ_n кривая распределения *1* вытягивается вверх, одновременно сжимаясь вдоль оси абсцисс. Таким образом, малому значению σ_n соответствует преобладание малых случайных погрешностей, а вместе с тем и большая точность измерения данной величины; при большом же σ_n большие случайные погрешности встречаются значительно чаще, следовательно, точность измерения меньше.

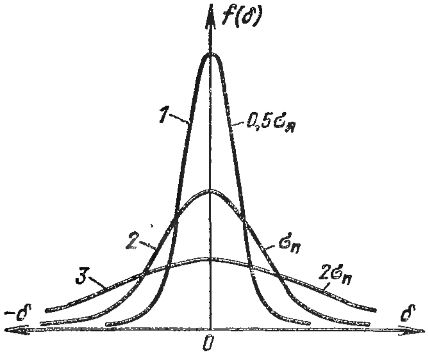


Рис. 1-4-2. Кривые нормального распределения случайных погрешностей, соответствующие трем различным значениям σ_n.

Конечная цель анализа выполненных измерений состоит в определении погрешности результата наблюдения ряда значений измеряемой величины $x_1, x_2, \ldots, x_n$ и погрешности их среднего арифметического значения, принимаемого как окончательный результат измерения, относительной частоты погрешностей и вероятности.

Оценка точности результата наблюдения. Для оценки точности результата наблюдения служит среднее квадратическое отклонение результата наблюдения σ_n (квадрат этой величины, т. е. σ_n^2, называется рассеянием или дисперсией результата наблюдения и обозначается обычно символом D). В реальных условиях мы имеем дело с конечными рядами наблюдаемых значений измеряемой величины, так что, определяя σ при ограниченном числе наблюдений, можем найти только приближенное значение или оценку этого отклонения, определяемого по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}\,, \qquad (1\text{-}4\text{-}7)$$

где n — число наблюдений; x_i — значение величины, полученное при i-м наблюдении; $\bar{X}$ — среднее арифметическое значение (результат измерений).

Выражение (1-4-7) при ограниченном числе наблюдений дает несмещенную оценку среднего квадратического отклонения результата наблюдений [1].

Для получения полного представления о точности и надежности оценки случайного отклонения результата наблюдения должны быть указаны доверительные границы, доверительный интервал и доверительная вероятность. При известном σ доверительные границы указываются следующим образом: нижняя граница $-\sigma$ или $\bar{X}-\sigma$, верхняя граница $+\sigma$ или $\bar{X}+\sigma$ (сокращенно $\pm\sigma$ или $\bar{X}\pm\sigma$), за пределы которых с вероятностью $P=0{,}683$ (или 68,3%) не выйдут значения случайных отклонений $x_i - X$ или результатов отдельных наблюдений x_i ряда измерений. Доверительный интервал выражается в виде

$$I_P = (\bar{X}-\sigma;\ \bar{X}+\sigma).$$

В зависимости от целей измерения могут задаваться и другие доверительные границы: $-t_P\sigma$ или $\bar{X}-t_P\sigma$ и $+t_P\sigma$ или $\bar{X}+t_P\sigma$. Чтобы избежать при определении значения величины

$$t_P = \arg\Phi\left(\frac{1+P}{2}\right)$$

обратного интерполирования табличной функции $\Phi(t)$ (1-4-6), пользуются специально составленной таблицей [1]. Значения t_P для наиболее употребительных доверительных вероятностей при $n \to \infty$ приведены в табл. 1-4-1. В инженерной практике предпочтение отдается вероятности 0,95 и 0,997.

Таблица 1-4-1

Значения t_P для наиболее употребительных вероятностей при $n\to\infty$

P	0,683	0,90	0,95	0,98	0,99	0,9973
t_P	1	1,645	1,96	2,33	2,58	3,000

Оценка точности результата измерения. Для оценки достоверности результата измерения, принимаемого равным среднему значению $\bar{X}$, применяют показатель точности, аналогичный показателю точности результата наблюдения. При этом согласно теории погрешностей оценка среднего квадратического отклонения результата измерения $\sigma_{\bar{X}}$ в $\sqrt{n}$ раз меньше оценки среднего квадратического отклонения результата наблюдения (1-4-7). Таким образом, при числе измерений n оценка среднего квадратического отклонения результата измерения

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{X})^2}\,. \qquad (1\text{-}4\text{-}8)$$

Доверительные границы погрешности результата измерения указываются следующим образом: нижняя граница $-\sigma_{\bar{X}}$ или $\bar{X}-\sigma_{\bar{X}}$, верхняя граница $+\sigma_{\bar{X}}$ или $\bar{X}+\sigma_{\bar{X}}$, за пределы которых с вероятностью 0,683 не выйдут погрешности результата измерения или среднее арифметическое значение $\bar{X}$. Доверительный интервал представляют в виде

$$I_P=(\bar{X}-\sigma_{\bar{X}};\ \bar{X}+\sigma_{\bar{X}}).$$

В зависимости от назначения измерений может быть задана и другая доверительная вероятность. В этом случае доверительные границы записываются как $-t_P\sigma_{\bar{X}}$ или $\bar{X}-t_P\sigma_{\bar{X}}$ и $+t_P\sigma_{\bar{X}}$ или $\bar{X}+ t_P\sigma_{\bar{X}}$, а доверительный интервал

$$I_P=(\bar{X}-t_P\sigma_{\bar{X}};\ \bar{X}+t_P\sigma_{\bar{X}}).$$

Оценка точности результата измерения при малом числе наблюдений. На практике, как правило, число измерений конечно и в большинстве случаев не превышает 15—20 отдельных наблюдений, а при ответственных измерениях — нескольких десятков. При малом числе наблюдений ($n \leqslant 20$) и условии, что распределение погрешностей отдельных измерений следует нормальному, пользуются для определения t_P таблицей, основанной на распределении Стьюдента.

Измерения при малом числе наблюдений чаще дают преуменьшенное значение средней квадратической погрешности по сравнению с погрешностью для достаточно большего ряда тех же измерений. Распределение Стьюдента, упрощенно говоря, учитывает это обстоятельство, и при одинаковой доверительной вероятности значение $t = v/\sigma$ больше в распределении Стьюдента, чем в нормальном. Иными словами, вероятность появления, например, одинаково больших погрешностей в распределении Стьюдента, т. е. при малом числе измерений, — больше.

В табл. 1-4-2 приведены вычисленные по распределению Стьюдента, вероятности $(1-P)$ появления погрешностей, превышающих $\sigma_{\bar{X}}$, $2\sigma_{\bar{X}}$ и $3\sigma_{\bar{X}}$ в зависимости от числа измерений n.

Таблица 1-4-2

Вероятности $(1-P)$ появления погрешностей, превышающих $\sigma_{\bar{X}}$, $2\sigma_{\bar{X}}$, $3\sigma_{\bar{X}}$

Число измерений n	$\sigma_{\bar{X}}$	$2\sigma_{\bar{X}}$	$3\sigma_{\bar{X}}$	Число измерений n	$\sigma_{\bar{X}}$	$2\sigma_{\bar{X}}$	$3\sigma_{\bar{X}}$
2	0,500	0,295	0,205	12	0,339	0,071	0,012
3	0,423	0,184	0,095	15	0,334	0,064	0,010
5	0,374	0,116	0,030	18	0,331	0,062	0,008
7	0,356	0,092	0,024	20	0,330	0,050	0,007
10	0,343	0,077	0,015	∞	0,317	0,046	0,003

Распределение Стьюдента с k степенями свободы определяется следующим выражением:

$$\sigma(t,\ k) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{k\pi}\,\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)}\left(1+\frac{t^2}{2}\right)^{-\frac{k+1}{2}}, \qquad (1\text{-}4\text{-}9)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty u^{x-1} e^{-u}\,du;$$

$$t = \frac{\bar{X} - x}{\sigma_{\bar{X}}}.$$

Выражение (1-4-9) позволяет решить вопрос о вероятности неравенств $-t_P < t < t_P$, $t_P > 0$ для любого значения t_P. Вероятность P того, что $-t_P < t < t_P$, определяется так:

$$P = P(-t_P < t < t_P) = \int_{-t_P}^{t_P} \sigma(t,\ k)\,dt = 2\int_0^{t_P} \sigma(t,\ k)\,dt. \qquad (1\text{-}4\text{-}10)$$

Из (1-4-10) следует равносильная вероятность

$$P(\bar{X} - t_P\sigma_{\bar{X}} < X < \bar{X} + t_P\sigma_{\bar{X}}) = P = 2\int_0^{t_P} \sigma(t,\ k)\,dt. \qquad (1\text{-}4\text{-}11)$$

Если задана вероятность, то, пользуясь выражением для P, можно найти положительное число t_P, которое будет зависеть только от P и n.

Полагая

$$\varepsilon = t_P\sigma_{\bar{X}}, \qquad (1\text{-}4\text{-}12)$$

получаем из уравнения (1-4-11)

$$P(\bar{X} - \varepsilon < X < \bar{X} + \varepsilon) = P; \qquad (1\text{-}4\text{-}13)$$

при этом ε будет зависеть от n, P и значений $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$, которые входят в ε через σ_X. Выражение (1-4-13) позволяет достаточно точно произвести оценку приближенного равенства $X \approx \bar{X}$.

При практическом применении распределения Стьюдента погрешность ε среднего арифметического значения (результата измерения) при малом числе наблюдений ($n \leqslant 20$) и заданной доверительной вероятности P определяется из значений σ или $\sigma_{\bar{X}}$, вычисленных по формулам (1-4-7) или (1-4-8), с помощью выражения

$$\varepsilon = t_P\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = t_P\sigma_{\bar{X}}. \qquad (1\text{-}4\text{-}14)$$

Значения t_P для наиболее употребительных доверительных вероятностей P и различных $k = n - 1$ приведены в табл. П1-4-1.

При $n \to \infty$ $(n > 200)$ распределение Стьюдента сходится с нормальным.

Для оценки среднего арифметического значения $\bar{X}$, принимаемого как окончательный результат измерения, указываются доверительные границы и доверительный интервал при выбранной доверительной вероятности. Доверительные границы указываются следующим образом: нижняя граница $\bar{X} - \varepsilon$, верхняя граница $\bar{X} + \varepsilon$ или сокращенно $\bar{X} \pm \varepsilon$. Доверительный интервал выражается в виде

$$I_P = (\bar{X} - \varepsilon;\ \bar{X} + \varepsilon),$$

где ε определяется формулой (1-4-14) и выражается в единицах измеряемой величины.

Если ε выражается в долях среднего арифметического значения измеряемой величины, то доверительные границы указываются следующим образом:

$$\bar{X}(1 \pm \varepsilon_0),\ \varepsilon_0 = t_P \frac{\sigma_{\bar{X}}}{\bar{X}}.$$

Пример 1. В табл. 1-4-3 приведены данные 12 измерений термо-э. д. с. платинородий-платинового термоэлектрического термометра при температуре рабочего конца 419, 58°C и свободных концов 0°C. Результаты измерений не содержат систематических погрешностей.

Используя формулу (1-4-3), получаем среднее арифметическое значение

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i = 3436{,}4 \text{ мкВ}.$$

Случайные отклонения результатов наблюдений $x_i - \bar{X}$ и их квадраты $(x_i - \bar{X})^2$ приведены в табл. 1-4-3.

Таблица 1-4-3

Данные измерения термо-э.д.с. платинородий-платинового термоэлектрического термометра при температуре рабочего конца 419,58°C и свободных концов 0°C

i	Термо-э.д.с. (x_i), мкВ	Случайные отклонения и их квадраты		i	Термо-э.д.с. (x_i), мкВ	Случайные отклонения и их квадраты	
		$x_i - \bar{X}$	$(x_i - \bar{X})^2$			$x_i - \bar{X}$	$(x_i - \bar{X})^2$
1	3436,8	+0,4	0,16	7	3436,0	−0,4	0,16
2	3435,8	−0,6	0,36	8	3436,1	−0,3	0,09
3	3437,0	+0,6	0,36	9	3436,7	+0,3	0,09
4	3436,1	−0,3	0,09	10	3436,7	+0,3	0,09
5	3436,7	+0,3	0,09	11	3435,6	−0,8	0,64
6	3437,2	+0,8	0,64	12	3436,1	−0,3	0,09

Средние квадратические отклонения результатов наблюдения и измерения определяются соответственно по формулам (1-4-7) и (1-4-8):

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{X})^2}=\sqrt{\frac{2,86}{11}}=0,5 \text{ мкВ};$$

$$\sigma_{\bar{X}}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=\frac{0,5}{\sqrt{12}}=0,14 \text{ мкВ}.$$

Истинное значение термо-э. д. с. X термоэлектрического термометра можно приближенно положить равным найденному среднему арифметическому значению $\bar{X}$, т. е. $X \approx X$. Для оценки достоверности этого равенства зададим доверительную вероятность $P = 0,95$ и найдем доверительные границы, соответствующие этой вероятности. По табл. П1-4-1 для $P = 0,95$ и $k = n - 1 = 11$ находим $t_P = 2,2$. Согласно выражению (1-4-14) получим:

$$\varepsilon=t_P S_{\bar{X}}=2,2\cdot 0,14=0,308\approx 0,3 \text{ мкВ}.$$

В соответствии с принятым условием, т. е. с вероятностью 0,95, мы можем утверждать, что истинное значение термо-э. д. с. заключено между доверительными границами:

$$\bar{X}-\varepsilon=3436,4-0,3=3436,1 \text{ мкВ};$$

$$\bar{X}+\varepsilon=3436,4+0,3=3436,7 \text{ мкВ},$$

или

$$X\approx\bar{X}=3436,4\pm 0,3 \text{ мкВ}.$$

Неточность оценки среднего квадратического отклонения и необходимое число наблюдений. Как было сказано выше, среднее квадратическое отклонение σ (или дисперсия σ^2) при ограниченном числе наблюдений может быть определено только приближенно. При этом оценка σ будет отличаться от среднего квадратического отклонения σ_n неограниченно большого ряда тех же измерений тем больше, чем меньше произведено наблюдений.

В математической статистике доказывается, что оценка среднего квадратического отклонения σ (или σ^2), найденная при малом числе наблюдений в предположении нормального распределения, позволяет судить о среднем квадратическом отклонении σ_n (или σ_n^2) неограниченно большого ряда тех же наблюдений и найти доверительный интервал для σ_n с заданной вероятностью P:

$$P(k_1\sigma\leqslant\sigma_n\leqslant k_2\sigma)=P. \qquad (1\text{-}4\text{-}15)$$

Коэффициенты k_1 и k_2 для вероятности P находят из условий

$$P(\sigma_n\geqslant k_1\sigma)=\frac{1-P}{2}; \qquad (1\text{-}4\text{-}16)$$

$$P(\sigma_n\leqslant k_2\sigma)=\frac{1+P}{2}. \qquad (1\text{-}4\text{-}17)$$

Значения k_1 и k_2 определяются из выражений

$$k_1=\sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} \qquad (1\text{-}4\text{-}18)$$

при χ_1^2, отвечающем вероятности $P_1 = (1 - P)/2$, $k = n - 1$;

$$k_2 = \sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \tag{1-4-19}$$

при χ_2^2 для $P_2 = (1 + P)/2$, $k = n - 1$.

Для определения значений χ_1^2 и χ_2^2, отвечающих соответственно вероятностям $P_1 = (1 - P)/2$ и $P_2 = (1 + P)/2$ и числу степеней свободы $k = n - 1$, пользуются таблицами распределения χ^2, которые обычно составляются только до $k = 30$, так как при степенях свободы более 30 распределение χ^2 может быть выражено через нормальное [1].

Доверительный интервал I_P для среднего квадратического отклонения σ_n находят по выражению

$$I_P = (k_1\sigma;\ k_2\sigma). \tag{1-4-20}$$

Коэффициенты k_1 и k_2 для наиболее часто выбираемых вероятностей P (0,90; 0,95; 0,98; 0,99), которым соответствуют вероятности $P_1 = (1 - P)/2$ (0,05; 0,025; 0,01; 0,005) и $P_2 = (1 + P)/2$ (0,95; 0,975; 0,99; 0,995) со степенями свободы $k = n - 1$, даны в табл. П1-4-2.

Следует отметить, что при малом числе измерений границы доверительного интервала, заключающие внутри себя σ_n, не расположены равносторонне по отношению к вычисленному значению среднего квадратического отклонения. При достаточно большом числе измерений можно ожидать, что σ_n лежит в равносторонних границах.

Пример 2. Определить доверительный интервал для σ_n, характеризующий неточность определения приближенного значения σ, по данным примера 1, если известно, что распределение близко к нормальному.

Выбираем вероятность $P = 0,95$. По табл. П1-4-2 находим при $k = n - 1 = 11$ для $P_1 = (1 - P)/2 = 0,025$ значение $k_1 = 0,709$; для $P_2 = (1 + P)/2 = 0,975$ значение $k_2 = 1,697$.

Доверительный интервал для σ при выбранной вероятности $P = 0,95$ и значении $\sigma = 0,5$ найдем по формуле (1-4-20):

$$I_P = (k_1\sigma;\ k_2\sigma) = (0,354;\ 0,848) \approx (0,4;\ 0,8).$$

При точных измерениях важно знать, сколько нужно сделать наблюдений измеряемой величины X, чтобы в результате независимых равноточных измерений получить приближенное равенство $X \approx \bar{X}$ с требуемой точностью и надежностью. Определение числа измерений для заданной точности среднего квадратического отклонения производится соответственно соображениям, изложенным ниже. Задаются вероятностью того, что среднее квадратическое отклонение σ_n для большого числа наблюдений находится в некоторых границах, опирающихся на оценку среднего квадратического отклонения σ при малом числе наблюдений.

---

[1] Подробные сведения о распределении χ^2 и о методах нахождения доверительного интервала для σ_n содержатся в [1, 4].

Пусть, например, ставится вопрос о наименьшем числе измерений для определения среднего квадратического отклонения σ_n по небольшому ряду наблюдений с дисперсией σ^2 при вероятности 0,95 для отношения верхней границы к нижней 2,4 ($k_2/k_1 = 2{,}4$). Учитывая выражения (1-4-18) и (1-4-19), имеем:

$$n-1=k_1^2\chi_1^2=k_2\chi_2^2;$$

$$\frac{\chi_1}{\chi_2}=\frac{k_2}{k_1}=2{,}4.$$

По табл. П1-4-2 для вероятностей $P_1 = 0{,}025$ и $P_2 = 0{,}975$ находим для заданного отношения $k_2/k_1 = 1{,}697/0{,}709 = 2{,}4$ и наименьшее число наблюдений $n = 12$.

Если взять не столь широкие границы, то число наблюдений оказывается более значительным. Пусть при вероятности 0,95 границы установлены в $\pm 0{,}1$. Определим число измерений для заданных условий, пользуясь формулой [4]:

$$\frac{\chi_1}{\chi_2}=\frac{k_2}{k_1}=\frac{t_P+\sqrt{2(n-2)-1}}{-t_P+\sqrt{2(n-2)-1}}.$$

Для $k_2 = 1{,}1$, $k_1 = 0{,}9$ и $t_P = 1{,}96$, отвечающего вероятности 0,95, имеем:

$$\sqrt{2(n-2)-1}=\frac{2{,}222}{0{,}222}t_P=\frac{2{,}222}{0{,}222}1{,}96=19{,}6,$$

откуда $n = 194$.

С уменьшением ширины доверительной границы значительно растет число наблюдений. Поэтому для достижения желательной точности измерений необходимо заботиться не только о числе, но и о точности измерений отдельных наблюдений, отражающейся на значении оценки среднего квадратического отклонения σ.

Наблюдения, не заслуживающие доверия. Выше было сказано, что наблюдения, содержащие грубые погрешности, должны быть отброшены как не заслуживающие доверия. Поэтому необходимо уточнить, в каких же случаях сильно отклоняющиеся результаты измерения должны быть отброшены. На практике часто пользуются простым предложением отбрасывать результаты наблюдения, содержащие большие погрешности, т. е. превышающие 3σ или 4σ. Однако этот прием нельзя считать достаточно строгим, так как погрешности являются случайными и потому появление большой погрешности само по себе не зависит от числа наблюдений.

При малом числе наблюдений для определения, какие наблюдения из ряда подлежат отбрасыванию, применяют критерий В. И. Романовского, основанный на распределении Стьюдента. Пусть при измерении некоторой постоянной величины получено $n + 1$ результатов наблюдения $x_1, x_2, \ldots, x_n, x_{n+1}$. При этом n значений результатов наблюдения измеряемой величины не вызывают сомнений в отношении соответствия их закономерному ряду, а одно наблюдение x_{n+1} кажется сомнительным в этом ряду. Определим для ряда наблюдений от x_1 до x_n среднее арифметическое значение

$$\bar{X}_n=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$$

и оценку среднего квадратического отклонения

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{X}_n)^2}\ .$$

Далее, исходя из степени достоверности, которая должна быть обеспечена, зададимся вероятностью P_k того, что разность $(x_{n+1} - \bar{X}_n)$ не превышает некоторое допускаемое значение ε_k, определяемое по формуле

$$\varepsilon_k = t_k\sigma.$$

Значения t_k для различных P_k и n приведены в табл. 1-4-4.

Таблица 1-4-4

Значения t_k для различных P_k и n

n	P_k				n	P_k			
	0,05	0,02	0,01	0,005		0,05	0,02	0,01	0,005
2	15,56	38,97	77,96	779,7	10	2,37	2,96	3,41	5,01
3	4,97	8,04	11,46	36,5	12	2,29	2,83	3,23	4,62
4	3,56	5,08	6,53	14,46	14	2,24	2,74	3,12	4,37
5	3,04	4,10	5,04	9,43	16	2,20	2,68	3,04	4,20
6	2,78	3,64	4,36	7,41	18	2,17	2,64	3,00	4,07
7	2,62	3,36	3,96	6,37	20	2,145	2,60	2,93	3,98
8	2,51	3,18	3,71	5,73	∞	1,96	2,33	2,58	3,29
9	2,43	3,05	3,54	5,31					

Если $\varepsilon_k < x_{n+1} - \bar{X}_n$, наблюдение x_{n+1} подлежит исключению из ряда, как не заслуживающее доверия.

Пример 3. В дополнение к наблюдениям, данные которых приведены в табл. 1-4-3, было проведено тринадцатое наблюдение, значение которого $x_{13} = 3440{,}4$ мкВ, а отклонение от среднего $x_{13} - \bar{X}_n = +4{,}0$ мкВ. Оценка средиего квадратического отклонения по результатам 12 наблюдений (табл. 1-4-3)

$$\sigma_{12}=\sqrt{\frac{2{,}86}{11}}=0{,}5 \text{ мкВ}.$$

Задаваясь $P_k = 0{,}005$ по табл. 1-4-4, для $n = 12$ находим $t_k = 4{,}62$ и определяем:

$$\varepsilon_k = 4{,}62\cdot 0{,}5 = 2{,}3 \text{ мкВ}.$$

Тринадцатое наблюдение, для которого $x_{13} - \bar{X}_{12} = +4{,}0$ мкВ, подлежит исключению из ряда, так как $4 > 2{,}3$.

Оценка погрешности среднего взвешенного. В некоторых случаях при определении значения измеряемой величины приходится иметь дело с обработкой рядов прямых измерений различной достоверности, т. е. измерений, производимых с различной степенью точности или с различным числом наблюдений в каждом ряду и т. п. Вследствие этого не представляется возможным принять за наиболее

достоверное значение измеряемой величины среднее арифметическое из всех полученных результатов измерения. В этом случае необходимо ввести понятие о весе измерения как о числе, служащем мерой степени доверия к результату измерения. При этом, чем больше вес измерения (степень доверия к результату), тем большее число ему приписывается.

Учет различной достоверности результатов измерений отдельных рядов приводит к определению так называемого «среднего взвешенного» $\bar{X}_{с.в}$ по формуле

$$\bar{X}_{с.в}=\frac{\bar{X}_1 p_1+\bar{X}_2 p_2+\ldots+\bar{X}_m p_m}{p_1+p_2+\ldots+p_m}, \qquad (1\text{-}4\text{-}21)$$

где $\bar{X}_j$ — средние значения для отдельных групп наблюдений ($j = 1 \div m$); p_j — соответствующие им веса измерений ($j = 1 \div m$).

Веса измерений, произведенных с различной степенью точности чаще всего устанавливают обратно пропорциональными дисперсии σ_j^2 ($p_j = 1/\sigma_j^2$).

В некоторых случаях (например, при равноточных измерениях с различным числом наблюдений в каждом ряду) веса устанавливаются пропорционально числу наблюдений в каждом ряду, взятых для вычисления среднего арифметического каждого ряда измерений. Вес ряда с наименьшим количеством наблюдений для удобства принимают за единицу, а веса остальных рядов находят как частное от деления числа наблюдений в данном ряду на число наблюдений ряда, вес которого принят за единицу.

Для оценки точности среднего взвешенного пользуются средним квадратическим отклонением, вычисляемым по формуле

$$\sigma_{с.в}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m} p_j\left(\bar{X}_j-\bar{X}_{с.в}\right)^2}{(m-1)\sum_{j=1}^{m} p_j}} \qquad (1\text{-}4\text{-}22)$$

где m — число рядов измерений.

Доверительные границы и доверительный интервал среднего взвешенного при заданной доверительной вероятности определяют аналогично рассмотренному выше.

Оценка точности косвенных измерений. В косвенных измерениях определение значения искомой величины y производится на основании прямых измерений других величин, связанных с y функциональной зависимостью

$$y=f\left(\bar{X}_1,\ \bar{X}_2,\ \ldots,\ \bar{X}_m\right), \qquad (1\text{-}4\text{-}23)$$

где $\bar{X}_v$ ($v = 1 \div m$) — средние арифметические значения прямых измерений с одинаковым числом отдельных наблюдений $\bar{X}_{1i}$, $\bar{X}_{2i}$, ..., $\bar{X}_{mi}$ ($i = 1 \div n$).

При определении искомой величины y полагаем, что результаты измерения величин $\bar{X}_v$ свободны от систематических погрешностей.

Погрешность результата косвенного измерения величины y зависит от погрешности результатов прямых измерений независимых друг от друга величин $\bar{X}_v$.

Для оценки точности результата косвенного измерения величины y применяют среднее квадратическое отклонение, вычисляемое по формуле

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{X}_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{X}_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{X}_m}\right)^2 \sigma_m^2}, \qquad (1\text{-}4\text{-}24)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_m$ — средние квадратические отклонения результатов измерения величин $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \ldots, \bar{X}_m$.

В зависимости от требований к измерениям может быть задана различная доверительная вероятность. Обозначая для выбранной доверительной вероятности P через ε_v погрешности величин $\bar{X}_v$, связанные с σ_{vi} или σ_v равенством

$$\varepsilon_v = t_P \frac{\sigma_{vi}}{\sqrt{n}} = t_P \sigma_v$$

и подставляя ε_v в формулу (1-4-24), получаем:

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 \varepsilon_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{X}_2}\right)^2 \varepsilon_2^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{X}_m}\right)^2 \varepsilon_m^2}. \qquad (1\text{-}4\text{-}25)$$

Погрешности σ_v и ε_v в формулах (1-4-24) и (1-4-25) выражаются в тех же единицах, что и искомая величина y.

Если непосредственно измеряемые величины являются по своей природе разнородными, то пользуются относительными погрешностями этих величин.

При использовании оценок средних квадратических отклонений σ_{vi} значение погрешности результата косвенного измерения также будет приближенно.

Приведенные выше формулы для определения погрешности результата косвенного измерения y могут быть использованы и в том случае, если y находится по отдельным значениям прямых измерений, т. е.

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_m).$$

В этом случае должно быть известно значение среднего квадратического отклонения.

1-5. Основные сведения о метрологических характеристиках средств измерений

При оценке качества и свойств средств измерений большое значение имеет знание их метрологических характеристик, позволяющих выполнить оценку погрешностей при работе как в статическом, так и динамическом режиме.

Класс точности и допускаемые погрешности. Класс точности средств измерений является обобщенной их характеристикой,

определяемой пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность. Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений. Следует иметь в виду, что класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих средств, так как точность зависит также от метода измерений и условий их выполнения.

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений для каждого из классов точности устанавливаются в виде абсолютных и приведенных погрешностей.

Средствам измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в единицах измеряемой величины, присваиваются классы точности, обозначаемые порядковыми номерами, причем средствам измерений с большим значением допускаемых погрешностей устанавливаются классы большего порядкового номера. В этом случае обозначение класса точности средства измерений не связано со значением предела допускаемой погрешности, т. е. носит условный характер.

Средствам измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых задаются в виде приведенных (относительных) погрешностей, присваивают классы точности, выбираемые из ряда (ГОСТ 13600-68):

$$K=(1;\ 1{,}5;\ 2{,}0;\ 2{,}5;\ 3{,}0;\ 4{,}0;\ 5{,}0;\ 6{,}0)\cdot 10^n;$$
$$n=1;\ 0;\ -1;\ -2\ \ldots$$

Конкретные классы точности устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений. Чем меньше число, обозначающее класс точности средства измерений, тем меньше пределы допускаемой основной погрешности. Классы точности средств измерения, нормируемых по приведенным погрешностям, имеют связь с конкретным значением предела погрешности.

Средства измерений с двумя или более диапазонами (или шкалами) могут иметь два или более классов точности.

Основной погрешностью средства измерений называется погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях. Под пределом допускаемой основной погрешности понимают наибольшую (без учета знака) основную погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению. Эту погрешность для краткости часто называют допускаемой основной погрешностью.

Под нормальными условиями применения средств измерений понимаются условия, при которых влияющие величины (температура окружающего воздуха, барометрическое давление, влажность, напряжение питания, частота тока и т. д.) имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. Для средств измерений нормальными условиями применения явля-

ется также определенное пространственное их положение, отсутствие вибрации, внешнего электрического и магнитного поля, кроме земного магнитного поля.

В качестве нормальных значений или нормальной области значений влияющих величин принимают, например, температуру окружающего воздуха 20±5°С (или 20±2°С); барометрическое давление 760±25 мм рт. ст. (101,325±3,3 кПа); напряжение питания 220 В с частотой 50 Гц и т. д. Приведенные в качестве примера нормальные значения или нормальные области значений влияющих величин не для всех средств измерений обязательны. В каждом отдельном случае нормальные значения или нормальные области значений влияющих величин устанавливаются в стандартах или технических условиях на средства измерений данного вида, при которых значение допускаемой основной погрешности не превышает установленных пределов.

Указанные нормальные условия применения средств измерений обычно не являются рабочими условиями их применения. Поэтому для каждого вида средств измерений в стандартах или технических условиях устанавливают расширенную область значений влияющей величины, в пределах которой значение дополнительной погрешности (изменение показаний для измерительных приборов) не должно превышать установленных пределов.

В качестве расширенной области значений влияющих величин принимают, например, температуру окружающего воздуха от 5 до 50°С (или от —50 до +50°С), относительную влажность воздуха от 30 до 80% (или от 30 до 98%), напряжение питания от 187 до 242 В и т. д. В некоторых случаях при нормировании пределов допускаемых дополнительных погрешностей средств измерений дается функциональная зависимость допускаемой дополнительной погрешности от изменения влияющей величины.

Под изменением показаний прибора (дополнительной погрешностью меры, преобразователя по входу или выходу) понимается изменение погрешности прибора (меры, преобразователя) вследствие изменения ее действительного значения, вызванное отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальной области значений.

Под пределом допускаемой дополнительной погрешности (изменением показаний) понимается наибольшая (без учета знака) дополнительная погрешность (изменение показаний), вызываемая изменением влияющей величины в пределах расширенной области, при которой средство измерений может быть признано годным и допущено к применению.

Необходимо отметить, что терминам основная и дополнительная погрешности соответствуют фактические погрешности средств измерений, имеющие место при данных условиях.

Отметим также, что терминам пределы допускаемой дополнительной (или соответственно основной) погрешности соответствуют граничные погрешности, в пределах которых средства измерений

по техническим требованиям могут считаться годными и быть допущены к применению. Все пределы допускаемых погрешностей устанавливаются для значений измеряемых величин, лежащих в пределах диапазона измерений прибора, а для измерительных преобразователей — в пределах диапазона преобразования.

Следует также отметить, что в рабочих условиях могут иметь место внешние явления, воздействие которых не выражается в непосредственном влиянии на показания прибора или выходной сигнал преобразователя, но они могут явиться причиной порчи и нарушения действия измерительного блока, механизма, преобразователя и т. п., например на приборы и преобразователи могут воздействовать агрессивные газы, пыль, вода и т. д. От воздействия этих факторов приборы и преобразователи защищают с помощью защитных корпусов, чехлов и т. д.

Кроме того, на средства измерений могут воздействовать внешние механические силы (вибрация, тряска и удары), которые могут привести к искажению показаний приборов и невозможности осуществления отсчета во время этих воздействий. Более сильные воздействия могут вызвать порчу или даже разрушение прибора и преобразователя. Измерительные приборы и преобразователи, предназначенные для работы в условиях механических воздействий, различных по интенсивности и другим характеристикам, защищают специальными устройствами от разрушающего действия или усиливают их прочность.

В зависимости от степени защищенности от внешних воздействий и устойчивости к ним приборы и преобразователи подразделяются (ГОСТ 2405-63) на обыкновенные, виброустойчивые, пылезащищенные, брызгозащищенные, герметические, газозащищенные, взрывозащищенные и т. д. Это дает возможность выбирать средства измерений применительно к рабочим условиям.

Способы числового выражения погрешностей средств измерений. Абсолютная погрешность измерительного прибора определяется разностью между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины. Если Δ — абсолютная погрешность, x — показание прибора, $x_д$ — действительное значение измеряемой величины, то

$$\Delta = x - x_д. \qquad (1\text{-}5\text{-}1)$$

Абсолютная погрешность меры равна разности между номинальным значением меры и действительным значением воспроизводимой ею величины и определяется аналогичной (1-5-1) формулой.

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу — разность между значением величины на входе преобразователя, определяемым по действительному значению величины на его выходе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю, и действительным значением величины на входе преобразователя.

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по выходу — разность между действительным значением величины на выходе преобразователя, отображающей измеряемую величину, и значением величины на выходе, определяемым по действительному значению величины на входе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю.

При оценке качества мер и измерительных приборов иногда применяют относительные погрешности, выражаемые в долях (или процентах) действительного значения измеряемой величины:

$$\Delta_о = \frac{x - x_д}{x_д}. \qquad (1\text{-}5\text{-}2)$$

Относительную погрешность можно выразить также в долях (или процентах) номинального значения меры или показания прибора:

$$\Delta'_о = \frac{x - x_д}{x}. \qquad (1\text{-}5\text{-}3)$$

Относительные погрешности (1-5-2), (1-5-3) практически равнозначны. Действительно, найдем разность между $\Delta_о$ и $\Delta'_о$:

$$\Delta_о - \Delta'_о = \frac{\Delta_о^2}{1 + \Delta_о}. \qquad (1\text{-}5\text{-}4)$$

При $\Delta_о = \pm 0{,}02$ разность (1-5-4) составляет 0,0004, при $\Delta_о = \pm 0{,}03$ она равна 0,0009 и лишь при $\Delta_о = \pm 0{,}05$ она достигает 0,0024. Отсюда следует, что при погрешности, не превышающей $\pm 3\%$, практически безразлично, какой погрешностью пользоваться: $\Delta_о$ или $\Delta'_о$.

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений для каждого из классов точности устанавливаются в виде абсолютных или приведенных погрешностей. Основная и дополнительные погрешности выражаются одним и тем же способом.

Абсолютная погрешность выражается:

1) одним значением

$$\Delta = \pm a, \qquad (1\text{-}5\text{-}5)$$

где Δ — предел допускаемой абсолютной погрешности; a — постоянное число;

2) в виде зависимости предела допускаемой погрешности от номинального значения, показания или сигнала x, выраженной двухчленной формулой

$$\Delta = \pm (a + b\,|x|), \qquad (1\text{-}5\text{-}6)$$

где b — постоянное число;

3) в виде таблицы пределов допускаемых погрешностей для разных номинальных значений, показаний или сигналов.

Приведенная погрешность определяется формулой

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X_N} 100, \qquad (1\text{-}5\text{-}7)$$

где δ — предел допускаемой приведенной погрешности в процентах нормирующего значения; X_N — нормирующее значение, выраженное в единицах измеряемой величины; Δ — абсолютная погрешность средства измерений.

Нормирующее значение при вычислении основной и дополнительных погрешностей или пределов допускаемых погрешностей принимается равным:

для средств измерений с односторонней шкалой (диапазоном преобразования) — верхнему пределу измерений ($x_в$);

для средств измерений с двусторонней шкалой (диапазоном преобразования) — арифметической сумме верхнего и нижнего пределов измерений ($|x_в| + |x_н|$);

для средств измерений с безнулевой шкалой (диапазоном преобразования) — разности верхнего и нижнего пределов измерений ($x_в - x_н$), т. е. диапазону измерений.

Следует обратить внимание на то, что для рассматриваемого способа нормирования погрешностей средств измерений предел допускаемой основной погрешности показаний δ, выраженный в процентах нормирующего значения X_N, совпадает с числом K, принимаемым для обозначения класса точности средств измерений.

Если K — класс точности средства измерений, то пределы допускаемой основной абсолютной погрешности показаний определяются по формуле

$$\Delta = \pm \frac{K X_N}{100} = \pm \frac{\delta X_N}{100}. \qquad (1\text{-}5\text{-}8)$$

П р и м е р 1. Вторичный прибор с безнулевой шкалой и диапазоном измерений 25—50 мВ класса точности 0,5 имеет пределы допускаемой основной погрешности показаний $\delta = \pm 0{,}5\%$ нормирующего значения $X_N = x_в - x_н$. Определим пределы допускаемой основной абсолютной погрешности показаний по формуле (1-5-8)

$$\Delta = \pm \frac{\delta (x_в - x_н)}{100} = \pm \frac{0{,}5 (50 - 25)}{100} = \pm 0{,}125 \text{ мВ}.$$

Для самопишущих приборов пределы допускаемой основной погрешности записи, выражаемой в виде приведенной погрешности, устанавливают в зависимости от класса точности и ширины поля записи на диаграммной бумаге.

Дополнительные погрешности средств измерений или изменение показаний измерительных приборов, вызываемые изменением i-й влияющей величины на нормированное отклонение (или в пределах расширенной области), выражаются в виде приведенной погрешности в процентах нормирующего значения X_N и определяются по формуле

$$\delta_{vi} = \frac{100 (x_п - x_{п.н})}{X_N}, \qquad (1\text{-}5\text{-}9)$$

где $\delta_{\nu i}$ — предел допускаемой дополнительной погрешности; $x_п$ — показание прибора или значение выходного сигнала преобразователя в данной точке шкалы (диапазона преобразования); $x_{п.н}$ — показание прибора или значение выходного сигнала преобразователя в данной точке шкалы (диапазона преобразования) при нормальном значении или нормальной области значений влияющей величины (принимается за действительное значение).

Если в стандарте или монтажно-эксплуатационной инструкции указывается, что вторичный прибор предназначен для применения в рабочих условиях в расширенной области значений влияющей величины, например при температуре окружающего воздуха от 5 до 50°C, это означает, что предел допускаемой дополнительной погрешности (изменение показаний для измерительного прибора) в пределах этой области нормирован. В данном случае согласно стандарту, изменение показаний прибора, вызванное изменением температуры окружающего воздуха от 20 ± 5°C до любой температуры в пределах от 5 до 50°C, не должно превышать нормированного размера $\delta_{н.т}$, например равного значению предела допускаемой основной погрешности ($\delta_{н.т} = \delta$) или определенной доли этого значения на каждые 10°C изменения температуры. Таким образом, значение нормированного отклонения температуры здесь равно 10°C.

Пример 2. Измерительный прибор класса точности 0,5 с односторонней шкалой работает при температуре окружающего воздуха 40°C. Определить изменение показаний прибора, возникающее вследствие отклонения температуры от нормальной области значений 20 ± 5°C.

Для данного прибора нормированный размер изменения показаний согласно стандарту (ГОСТ 7164-71), составляет $\delta_{\nu i} = \delta_{н.т} = \pm 0{,}2\%$ диапазона измерений ($X_N = x_в$). Нормированное отклонение температуры от нормальной области равно $\theta_{н.о} = 10°C$. Действительное отклонение температуры $\theta_{д.о} = 40-25 = 15°C$. Изменение показаний прибора равно

$$\delta_{и.п} = \pm \frac{\delta_{н.т}\theta_{д.о}}{\theta_{н.о}} = \pm \frac{0{,}2 \cdot 15}{10} = \pm 0{,}3\%$$

диапазона измерений, т. е. в этом случае суммарная погрешность показаний прибора составляет ±0,8% диапазона измерений.

Для некоторых средств измерений (пневмоэлектрических преобразователей, манометров и других приборов) предел допускаемой дополнительной погрешности (изменение показаний), вызываемой изменением температуры окружающего воздуха от нормальной области значений до любой температуры в пределах расширенной области значений, нормируется функциональной зависимостью от изменения температуры. Например, для манометрических термометров (ГОСТ 8624-71) изменение показаний (выходного сигнала) в процентах нормирующего значения X_N, вызываемое изменением температуры окружающего воздуха от $t = 20 \pm 5°C$ до любой температуры $t_1 = 5 \div 50°C$ (или от −50 до +50°C), не должно превышать

$$\delta_{и.п} = \pm (x_{н.п} + \alpha_п \Delta t), \qquad (1\text{-}5\text{-}10)$$

где $x_{н.п}$ — значение допускаемого непостоянства показаний прибора (выходных сигналов) — не более половины предела допускаемой основной погрешности; Δt — абсолютное значение разности температур $(t_1 - t)$, °C; $\alpha_п$ — температурный коэффициент, % на 1°C.

Под непостоянством показаний прибора (значений выходных сигналов) понимают разность между показаниями (значениями выходных сигналов) при многократных поверках и одинаковых условиях при прямом или обратном ходе. Это непостоянство не должно превышать половины абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности.

Питание силовой электрической цепи автоматического измерительного прибора класса точности 0,5 (ГОСТ 7164-71) при нормальных условиях должно осуществляться от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. При изменении же напряжения питания силовой цепи прибора на +10 и —15% номинального значения (220 В) изменение показаний прибора не должно превышать $\delta_{дu} = 0{,}25\%$ нормирующего значения X_N, т. е. половины предела допускаемой основной погрешности.

Выше отмечалось, что погрешности средств измерений в эксплуатационных условиях могут изменяться по различным причинам, в том числе вследствие изменений влияющих величин, причем эти изменения могут комбинироваться случайным образом. Однако в действующих стандартах на средства измерений, применяемые для контроля и измерения теплоэнергетических параметров, пределы допускаемой суммарной дополнительной погрешности не нормируются, за исключением ГОСТ 13320-67 (Газоанализаторы автоматические и полуавтоматические. Типы. Основные параметры). В этом стандарте указывается, что предел допускаемой суммарной дополнительной погрешности газоанализаторов при одновременном изменении всех влияющих величин не должен превышать удвоенного значения предела допускаемой основной погрешности.

Предел допускаемой суммарной дополнительной погрешности газоанализаторов определяется как квадратный корень из суммы квадратов пределов допускаемых дополнительных погрешностей каждой из влияющих величин.

Поправка. Под поправкой понимают значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности (§ 1-4).

Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют поправкой к значению мер; поправку, вводимую в показания измерительного прибора, называют поправкой к показанию прибора. Поправка, вводимая в показания прибора $x_п$, дает возможность получить действительное значение измеряемой величины $x_д$.

Если c — поправка, выраженная в единицах измеряемой величины, то согласно определению

$$x_д = x_п + c,$$

откуда

$$c = x_д - x_п, \qquad (1\text{-}5\text{-}11)$$

т. е. поправка равна абсолютной погрешности измерительного прибора, взятой с обратным знаком.

В некоторых случаях для исключения систематической погрешности пользуются поправочным множителем, представляющим собой число, на которое умножают результат измерения.

При поверке средств измерений поправками снабжаются только образцовые средства измерений, а также рабочие средства измерений повышенной точности. Промышленные (технические) средства измерений при их поверке поправками не снабжаются, так как они предназначены для применения без поправок. Если в результате поверки промышленных средств измерений будет установлено, что их погрешности не выходят за пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей, то они признаются годными к применению.

Однако при измерении теплоэнергетических параметров с помощью технических средств измерений в ряде случаев, как это показано ниже, необходимо учитывать различные влияющие на них величины или факторы.

При применении и определении метрологических характеристик средств измерений (преобразователей, измерительных устройств, вторичных приборов и др.) необходимо обращать внимание на стабильность режима их работы. Для достижения стабильного установившегося режима работы средства измерений требуется некоторое время, называемое временем выхода на рабочий установившийся режим. Оно обычно указывается в заводской инструкции.

Статическая характеристика, коэффициент передачи и чувствительность средств измерений. Средства измерений, а во многих случаях и их преобразовательные элементы выполняются так, что происходящие в них преобразования сигналов обладают свойством необратимости или направленности. Это значит, что изменение сигнала на входе средства измерения (или его элемента) приводит к соответствующему изменению сигнала на выходе, но обратное влияние выходного сигнала на входной отсутствует. Сигнал, вызывающий изменение другой величины, называют входной величиной (сигналом), а сигнал на выходе — выходной величиной (сигналом). Статической характеристикой средства измерений (измерительного прибора или преобразователя) называют функциональную зависимость между выходной величиной y (перемещением указателя прибора или выходным сигналом преобразователя) и входной величиной x в установившемся режиме:

$$y = f(x). \qquad (1\text{-}5\text{-}12)$$

Функциональную зависимость (1-5-12) называют также уравнением шкалы прибора, градуировочной характеристикой прибора или преобразователя. Статическая характеристика может быть задана аналитически, графически (рис. 1-5-1) или в виде таблицы.

В общем случае линейная или линеаризованная статическая характеристика средства измерения описывается уравнением вида

$$y = a + kx, \tag{1-5-13}$$

где a — постоянная, имеющая размерность y; k — коэффициент, имеющий размерность y/x.

Если линейная статическая характеристика средства измерения проходит через начало координат (рис. 1-5-2, *а*), то уравнение (1-5-13) принимает вид:

$$y = kx. \tag{1-5-14}$$

Входящий в уравнения (1-5-13), (1-5-14) коэффициент k называют коэффициентом передачи. Понятие коэффициента передачи распространяется на отдельные элементы, обладающие свойством направленной передачи воздействий, и на средства измерения в целом. Однако такие средства измерений, как измерительные приборы, характеризуют не коэффициентом передачи, а чувствительностью S.

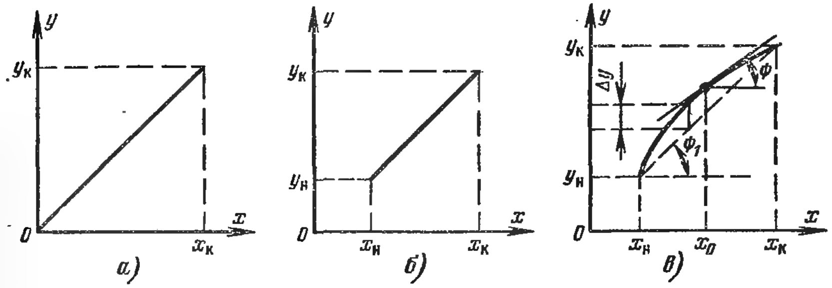


Рис. 1-5-1. Статические характеристики средств измерений.

а и *б* — линейные; *в* — нелинейная.

В общем случае уравнение шкалы измерительного прибора с линейной связью между входной величиной и показаниями имеет вид:

$$y = y_н + S(x - x_н),$$

где $y_н$ и $x_н$ — начальные значения соответственно выходной и входной величин.

Чувствительность прибора определяется по формуле

$$S = \frac{y_к - y_н}{x_к - x_н} = \frac{y_д}{x_д}, \tag{1-5-15}$$

где $y_д = y_к - y_н$ — диапазон изменения выходного сигнала; $x_д = x_к - x_н$ — диапазон изменения входного сигнала.

Для средств измерений в большинстве случаев предпочтительна линейная статическая характеристика. Нелинейные статические характеристики средств измерений допускаются только в том случае, если они обусловлены применяемым принципом измерения и нелинейность не может быть полностью устранена. Мерой отклоне-

ния нелинейной характеристики от линейной служит относительная нелинейность статической характеристики, определяемая отношением $\Delta y/X_N$, где Δy — максимальный отрезок выходной координаты между статической характеристикой и прямой, соединяющей начало ($x_н$) и конец ($x_к$) нелинейной характеристики (рис. 1-5-1, *в*), а X_N — нормирующее значение (см. выше).

Под чувствительностью измерительного прибора с нелинейной статической характеристикой понимают предел отношения приращения выходного сигнала Δy к приращению входной величины Δx:

$$S = \lim_{\Delta x \to 0} \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| = \frac{dy}{dx}. \tag{1-5-16}$$

Очевидно, что в случае линейной статической характеристики (рис. 1-5-1, *а*) чувствительность остается постоянной для любой точки шкалы. Если статическая характеристика задана в виде уравнения $y = f(x)$, то для определения чувствительности необходимо продифференцировать это уравнение по x. При нелинейной зависимости y от x чувствительность зависит от значения входного сигнала.

Если относительная нелинейность статической характеристики невелика или диапазон изменения x ограничен, то можно линеаризовать характеристику, т. е. заменить реальную нелинейную зависимость y от x приближенной линейной. Линеаризацию заданной графически характеристики осуществляют методом касательной или секущей. При линеаризации касательной (рис. 1-5-1, *в*) коэффициент передачи (или чувствительность) определяют тангенсом угла наклона касательной в данной точке:

$$k = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_0} = \frac{n_y}{n_x} \operatorname{tg} \psi, \tag{1-5-17}$$

где n_x, n_y — масштабы графика $y = f(x)$.

Линеаризация секущей позволяет, например, определить среднее значение коэффициента передачи (чувствительности), равное тангенсу угла наклона прямой, соединяющей начальную и конечную точки характеристики (рис. 1-5-1, *в*):

$$k_с = \frac{y_д}{x_д} = \frac{n_y}{n_x} \operatorname{tg} \psi_1. \tag{1-5-18}$$

Структурные схемы. При анализе сложных измерительных систем, содержащих несколько средств измерений, или самих средств измерений, которые можно расчленить на ряд элементов, обладающих свойством направленной передачи воздействий, используют структурные схемы. Каждый вид преобразования условно отображается на структурной схеме отдельным звеном, являющимся элементарным преобразователем входной величины. Связи между звеньями бывают различными: выходные сигналы звеньев могут разветвляться, вычитаться, суммироваться, изменять знак на обрат-

ный, воздействовать на вход других звеньев и т. д. Ниже рассматриваются некоторые типовые способы соединения звеньев.

Последовательное соединение звеньев или элементов (рис. 1-5-2) характеризуется тем, что выходной сигнал каждого звена является входным сигналом последующего. Полагая статические характеристики n звеньев линейными, вида (1-5-14), получаем статическую характеристику системы

$$y = k_1 k_2 \dots k_n x. \tag{1-5-19}$$

Из этого выражения следует, что коэффициент передачи средства измерений с последовательным соединением элементов равен произведению коэффициентов передачи этих элементов.

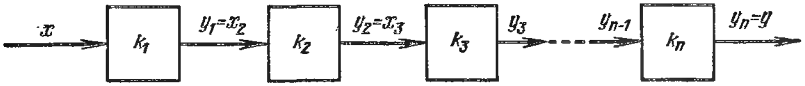


Рис. 1-5-2. Последовательное соединение звеньев.

Если статические характеристики звеньев или элементов нелинейны, то для средства измерений из двух звеньев или элементов имеем:

$$y_2 = f_2 [f_1 (x)]. \tag{1-5-20}$$

В тех случаях, когда функциональные зависимости $y_1 = f(x)$ и $y_2 = f(y_1)$ обратны по своему характеру, то общая характеристика средства измерений линейна. Это обстоятельство используется для линеаризации статических характеристик приборов и измерительных преобразователей.

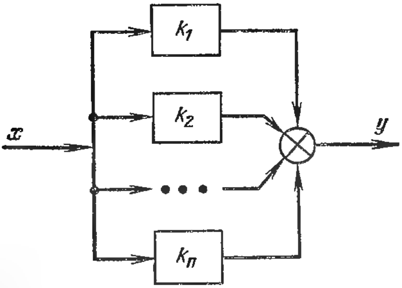


Рис. 1-5-3. Параллельное соединение звеньев.

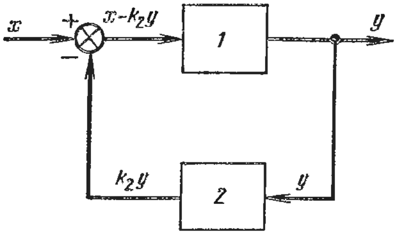


Рис. 1-5-4. Встречно-параллельное соединение звеньев.

При параллельном соединении выходные сигналы всех звеньев суммируются (рис. 1-5-3). В этом случае коэффициент передачи системы равен сумме коэффициентов

$$k = \sum_{i=1}^{n} k_i. \tag{1-5-21}$$

При встречно-параллельном соединении элементов или звеньев выходной сигнал первого элемента *1* подается на вход второго *2*, а выходной сигнал второго элемента $k_2 y$ — на вход первого (рис. 1-5-4). Если выходной сигнал второго элемента суммируется с входным сигналом x первого элемента, то осуществляется положительная обратная связь, если вычитается — отрицательная. Положительная обратная связь используется для увеличения коэффициента передачи си-

стемы, но она несколько ухудшает стабильность его. Отрицательная обратная связь, широко применяемая в измерительных преобразователях и других средствах измерений, увеличивает стабильность коэффициента передачи системы, но в то же время уменьшает его.

Для преобразовательного элемента *1* (рис. 1-5-4) без обратной связи имеем:

$$\Delta y = k_1 \Delta x, \qquad (1\text{-}5\text{-}22)$$

где k_1 — коэффициент передачи первого элемента.

При наличии отрицательной обратной связи с коэффициентом k_2 получим:

$$\Delta y = k_1 (\Delta x - k_2 \Delta y), \qquad (1\text{-}5\text{-}23)$$

или

$$\Delta y = \frac{k_1}{1 + k_1 k_2} \Delta x = k \Delta x, \qquad (1\text{-}5\text{-}24)$$

где

$$k = \frac{k_1}{1 + k_1 k_2} = \frac{1}{1/k_1 + k_2} \qquad (1\text{-}5\text{-}25)$$

— коэффициент передачи преобразовательного элемента *1* с отрицательной обратной связью.

При достаточно большом коэффициенте передачи элемента *1* ($k_1 \gg 1$) выражение (1-5-25) принимает вид $k = 1/k_2$. Из этого следует, что при выполнении условия $k_1 \gg 1$ свойства системы определяются только свойствами обратной связи. Например, стабильность коэффициента передачи системы будет в этом случае зависеть только от стабильности коэффициента передачи элемента обратной связи.

При положительной обратной связи коэффициент передачи системы

$$k = \frac{k_1}{1 - k_1 k_2}. \qquad (1\text{-}5\text{-}26)$$

Порог чувствительности измерительного прибора или преобразователя. Под порогом чувствительности понимают наименьшее изменение значения измеряемой (входной) величины, способное вызвать малейшее изменение показания измерительного прибора или выходного сигнала преобразователя. Порог чувствительности обычно выражают в долях абсолютного значения допускаемой основной погрешности средства измерений.

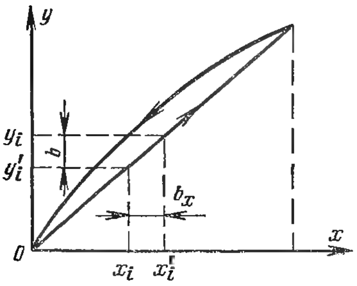


Рис. 1-5-5. Неоднозначность хода статической характеристики средства измерений.

Вариация. Постоянство показаний измерительного прибора или выходного сигнала измерительного преобразователя обычно характеризуется вариацией, которая проявляется в неоднозначности хода статической характеристики прибора или преобразователя при увеличении и уменьшении измеряемой или входной величины (рис. 1-5-5).

Наибольшая разность $b = | y_i - y_i' |$ между выходными сигналами y_i и y_i' преобразователя, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой или входной величины x_i,

называется вариацией показаний прибора или выходного сигнала преобразователя.

Вариацию показаний измерительного прибора обычно определяют экспериментально при нормальных условиях как наибольшую разность $b_x = |x_i - x_i'|$ действительных значений измеряемых величин x_i и x_i', соответствующих одной и той же отметке шкалы прибора y_i при плавном подводе указателя вначале при увеличении, а затем при уменьшении измеряемой величины.

Вариация выходного сигнала преобразователя может быть трансформирована (пересчитана) на его вход. В этом случае $b_x = |x_i - x_i'|$, где x_i и x_i' — действительные значения входной величины, соответствующие одному и тому же значению выходного сигнала y, при плавном увеличении и уменьшении входной величины.

Вариацию выражают в процентах нормирующего значения X_N и определяют по формуле

$$b_0 = \frac{b}{X_N} 100. \qquad (1\text{-}5\text{-}27)$$

Вариация показаний приборов или выходного сигнала преобразователей обычно нормируется в стандартах на отдельные виды или группы средств измерений в долях абсолютного значения допускаемой основной погрешности. Перед значением вариации знаки плюс и минус не ставят. Причинами вариации показаний в приборах или в измерительных механизмах являются люфты, трение в подвижных деталях или элементах и т. д.

1-6. Общие сведения о динамических характеристиках средств измерений

Рассмотренные выше основные метрологические свойства средств измерений характеризуют их только при статическом преобразовании измеряемой величины. При измерении (преобразовании) величины, меняющейся во времени, результаты измерения могут оказаться искаженными помимо допускаемых (статических) погрешностей и погрешностей, обусловленных условиями измерения, погрешностью еще одного вида, возникающей только в динамическом режиме и получившей вследствие этого наименование динамической погрешности.

В дальнейшем под динамической погрешностью средства измерений будем понимать разность между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени. При этом полагаем, что погрешности, обусловленные условиями измерения, отсутствуют.

Если входная величина выражается функцией $x(t)$, а выходная величина — функцией $y(t)$, то в каждый момент времени при отсутствии статических погрешностей абсолютная динамическая погреш-

ность

$$\Delta(t) = y(t) - y_{\text{и}}(t), \tag{1-6-1}$$

где $y_{\text{и}}$ — выходная величина «идеального» в динамическом отношении прибора, равная $y_{\text{и}}(t) = kx(t)$; здесь k — коэффициент передачи (или чувствительность) «идеального» прибора.

В дальнейшем будут рассматриваться методы описания линейных динамических измерительных устройств, под которыми понимают устройства, подчиняющиеся принципу наложения (суперпозиции). Согласно этому принципу эффект нескольких приложенных к измерительному устройству воздействий равен сумме эффектов каждого из этих воздействий в отдельности.

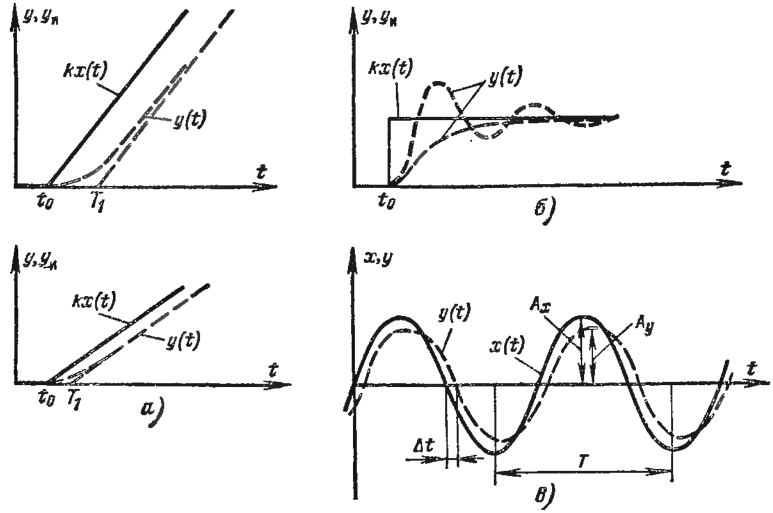


Рис. 1-6-1. Отклонение выходной величины от входной в динамическом режиме.

а — при изменении входной величины с постоянной скоростью; *б* — при ступенчатом изменении входной величины; *в* — при синусоидальном изменении входной величины.

В общем случае для количественной оценки динамической погрешности необходимо знать:

1) закон изменения входной величины $x(t)$, который может быть установлен точно или приближенно на основании изучения свойств контролируемого объекта;

2) закон изменения выходной величины $y(t)$, который зависит не только от вида входной величины, но и от динамических свойств данного средства измерений.

На рис. 1-6-1 представлены графики, иллюстрирующие различие выходных величин $y(t)$ реального и $y_{\text{и}}(t) = kx(t)$ идеального приборов при различных законах изменения входной величины $x(t)$.

Абсолютная динамическая погрешность в каждый момент времени выражается разностью ординат пунктирной и сплошной ли-

ний и, как видно из графиков, зависит от характера изменения $x(t)$. Например, при изменении входной величины с постоянной скоростью динамическая погрешность увеличивается с возрастанием скорости изменения входной величины и при достаточно больших значениях t выходная величина $y(t)$ запаздывает относительно $y_и(t)$ на время T_1 (рис. 1-6-1, *а*).

Ступенчатому изменению входной величины в зависимости от свойств средства измерений соответствует апериодическое изменение или затухающие колебания выходной величины (рис. 1-6-1, *б*). В последнем случае динамическая погрешность периодически, с определенной частотой, изменяет свой знак, уменьшаясь по мере затухания колебаний. При синусоидальном изменении входной величины с амплитудой A_x и некоторой постоянной частотой выходная величина в установившемся режиме представляет собою также синусоидальные колебания с амплитудой A_y той же частоты (рис. 1-6-1, *в*). Как видно из графика, амплитуда и фаза выходной величины не совпадают с амплитудой и фазой входной величины. Изменение амплитуды и фазовый временной сдвиг выходной величины зависят от свойств средств измерений и частоты входных колебаний.

Динамические свойства средств измерений зависят от внутренней структуры средства измерений и его элементов. Следует иметь в виду, что измерительные устройства (манометры, дифманометры), предназначенные для измерения давления, разности давлений, расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве и других величин, в эксплуатационных условиях работают при наличии соединительных импульсных линий. В этом случае необходимо учитывать влияние соединительных линий на динамику манометров и дифманометров [5].

Динамические свойства первичных преобразователей, например термоэлектрических термометров или термометров сопротивления зависят от размеров, положения чувствительного элемента в системе термометра, теплофизических свойств его отдельных элементов, а также от условий теплообмена между термометром и средой, температура которой измеряется.

Для аналитического описания динамики линейных измерительных устройств применяют линейные дифференциальные уравнения. Однако средства измерений, применяемые на теплоэнергетических установках, во многих случаях являются физическими устройствами, содержащими нелинейные элементы [14, 15]. Поэтому в инженерной практике идут на упрощение, которое обычно сводится к линеаризации характеристик средств измерений. Это позволяет использовать для описания характера динамического преобразования сигнала средством измерений линейные дифференциальные уравнения вида

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \ldots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y =$$

$$= b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \ldots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \qquad (1\text{-}6\text{-}2)$$

где a_i и b_j — постоянные коэффициенты ($i = 0, 1, 2, \ldots, n$; $j = 0, 1, 2, \ldots, m$).

Если в результате аналитического изучения исследуемого средства измерений получено дифференциальное уравнение, которое путем упрощений оказалось возможным привести к виду (1-6-2), то для оценки допустимости сделанных упрощений необходимо иметь для сравнения экспериментальные данные при некотором заданном виде испытательного воздействия. При этом для линеаризованных уравнений должны быть указаны исходный режим и границы допускаемого изменения входной величины, в которых принятые допущения позволяют использовать уравнение вида (1-6-2).

Наряду с дифференциальными уравнениями для описания динамических систем используют передаточные функции.

Для нулевых начальных условий уравнение (1-6-2) в изображениях по Лапласу записывают в следующем виде:

$$A(p)\,Y(p) = B(p)\,X(p), \tag{1-6-3}$$

где

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0;$$
$$B(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \ldots + b_1 p + b_0.$$

Отношение изображения выходной величины $Y(p)$ к изображению входной величины $X(p)$ при нулевых начальных условиях называется передаточной функцией. Согласно (1-6-3) передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{B(p)}{A(p)}. \tag{1-6-4}$$

Другими словами, передаточная функция определяется отношением полинома правой части $B(p)$ к полиному левой части $A(p)$ уравнения (1-6-3).

Как отмечалось выше, в большинстве случаев средства измерений или измерительные системы (например, первичный преобразователь — вторичный прибор) являются системой из последовательно соединенных элементов направленного действия (см. рис. 1-5-2). В этом случае передаточная функция измерительной системы равна произведению передаточных функций каждого элемента

$$W(p) = W_1(p)\,W_2(p). \tag{1-6-5}$$

Если измерительная система состоит из первичного прибора (манометра или дифманометра) с импульсными линиями и вторичного прибора, то передаточная функция такой измерительной системы имеет вид (1-6-5), но $W_1(p)$ — является передаточной функцией первичного прибора с импульсными линиями [5].

Передаточная функция полностью характеризует динамические свойства линейной системы и позволяет производить оценку свойств средств измерений. Для измерительных целей описание динамических свойств средств измерений передаточной функцией удобно

использовать в тех случаях, когда коэффициенты дифференциального уравнения зависят от условий применения средств измерений, а вид аппроксимирующей функции не изменяется. Характерным примером средств измерений такого типа являются термоэлектрические термометры, термометры сопротивления, манометрические термометры.

Динамические характеристики средств измерений, характеризующие реакцию средств измерений на гармонические воздействия в широком диапазоне частот, принято называть частотными характеристиками, которые включают в себя амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики. Частотные характеристики имеют наглядный физический смысл и могут быть получены экспериментальным и расчетным путем.

При экспериментальном определении частотных характеристик на вход средства измерений с помощью генератора подаются гармонические, например, синусоидальные колебания

$$x(t) = A_x \sin(\omega t + \varphi_x). \qquad (1\text{-}6\text{-}6)$$

Если исследуемое средство измерений является линейной динамической системой, то колебания выходной величины в установившемся режиме будут также синусоидальными (см. рис. 1-6-1, *в*)

$$y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi_y), \qquad (1\text{-}6\text{-}7)$$

где φ_y — начальная фаза, рад; ω — угловая скорость, рад/с.

Амплитуда выходных колебаний и их фазовый (временной) сдвиг зависят от свойств средств измерений и частоты входных колебаний.

Зависимость $A(\omega)$, показывающая, как изменяется с частотой отношение амплитуды выходных колебаний A_y линейной динамической системы к амплитуде входных колебаний A_x, называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) этой системы.

$$A(\omega) = \frac{A_y(\omega)}{A_x(\omega)}. \qquad (1\text{-}6\text{-}8)$$

Зависимость от частоты сдвига по фазе между входными и выходными колебаниями называется фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) системы

$$\varphi(\omega) = \varphi_y(\omega) - \varphi_x(\omega). \qquad (1\text{-}6\text{-}9)$$

Значение амплитудно-частотной характеристики исследуемого средства измерений для данной частоты колебаний ω_k

$$A(\omega_k) = \frac{A_y(\omega_k)}{A_x(\omega_k)}. \qquad (1\text{-}6\text{-}10)$$

Сдвиг по фазе $\varphi(\omega_k)$ между колебаниями $y(t)$ и $x(t)$ для значения ω_k определяется по формуле

$$\varphi(\omega_k) = -\omega_k \Delta t = -\frac{2\pi\,\Delta t}{T_k}, \qquad (1\text{-}6\text{-}11)$$

где Δt — время, соответствующее сдвигу (отставанию) по фазе между входными и выходными колебаниями (см. рис. 1-6-1, *в*), с; $T_k = 2\pi/\omega_k$ — период колебаний, с.

Эксперимент по определению частотных характеристик проводится для нескольких значений T_k входных колебаний с фиксированной амплитудой. Следует отметить, что у реальных средств измерений с возрастанием частоты обычно уменьшается амплитуда выходных колебаний и увеличивается временной сдвиг Δt выходной величины относительно входной, в результате чего растет и динамическая погрешность.

Экспериментальное определение частотных характеристик средств измерений следует проводить во всем рабочем диапазоне

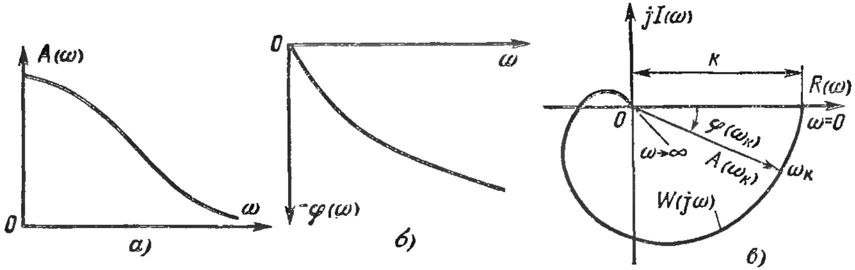


Рис. 1-6-2. Амплитудно-частотная (*а*), фазо-частотная (*б*) и комплексная частотная (*в*) характеристики динамической системы.

частот от 0 до $\omega_в$, при котором АЧХ отличается от 0. Здесь $\omega_в$ — верхняя граница, которая может быть выбрана из условия

$$\frac{A(\omega_в)}{A(\omega_{макс})} \leqslant \varepsilon.$$

На практике обычно выбирают $\varepsilon = 0{,}05 \div 0{,}1$.

Типичные АЧХ и ФЧХ показаны на рис. 1-6-2. Амплитудно-частотная характеристика представляет собой убывающую функцию частоты, а фазо-частотная характеристика — возрастающую функцию частоты (со знаком минус). Средствам измерения с колебательными свойствами характерно наличие резонансного пика на АЧХ.

Частотные характеристики средств измерений с неколебательными и колебательными свойствами показаны на рис. 1-6-3.

Передаточная функция позволяет легко получить частотные характеристики средств измерений расчетным путем. Для этого используется подстановка $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$), в результате которой выражение (1-6-4) принимает вид

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)}, \qquad (1\text{-}6\text{-}12)$$

где $W(j\omega)$ — комплексная частотная характеристика.

Отделяя в числителе и знаменателе выражения (1-6-12) вещественную часть от мнимой, получим

$$W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega), \tag{1-6-13}$$

где $R(\omega)$ и $I(\omega)$ — соответственно вещественная и мнимая частотные характеристики системы.

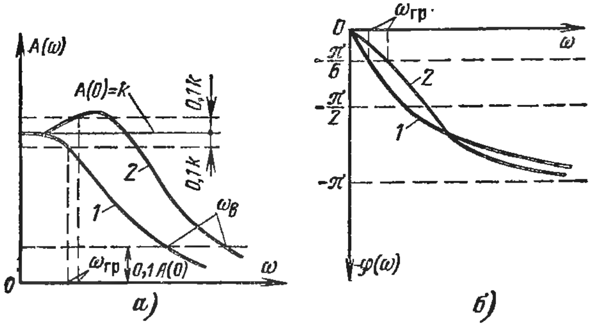


Рис. 1-6-3. Амплитудно-частотные (*а*), фазо-частотные (*б*) характеристики средств измерений с неколебательными (кривые *1*) и колебательными (кривые *2*) свойствами.

Комплексная частотная характеристика может быть записана и в показательной форме

$$W(j\omega) = A(\omega)\, e^{j\varphi(\omega)}.$$

Модуль $W(j\omega)$ равен

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} = \frac{A_y(\omega)}{A_x(\omega)},$$

а ее аргумент

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} I(\omega)/R(\omega).$$

Таким образом, характеристика $W(j\omega)$ объединяет в себе две рассмотренные выше частотные характеристики средства измерений: амплитудную $A(\omega)$ и фазовую $\varphi(\omega)$.

Полную динамическую характеристику средства измерений (звена) дает изменение значения $W(j\omega)$ звена при изменении ω от 0 до ∞. Геометрическое место конца вектора $W(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ называется частотным годографом или комплексной частотной характеристикой динамической системы. Эту характеристику называют также амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ) динамической системы.

Типичная комплексная частотная характеристика КЧХ средства измерений показана на рис. 1-6-2, *в*. Любая точка этой характеристики, определяющая положение вектора $W(j\omega)$ на комплексной плоскости, задает значение $A(\omega_k)$ как длину вектора и значе-

ние $\varphi(\omega_к)$ как угол, образованный этим вектором с положительной вещественной полуосью $R(\omega)$. Направление поворота по часовой стрелке принято считать отрицательным. При стремлении ω к нулю $W(j\omega)$ стремится к значению коэффициента передачи k. Мнимая часть $W(j\omega)$ при этом обращается в нуль. По КЧХ можно осуществить оценку динамической точности линейной динамической системы.

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики полностью описывают динамические свойства линейных средств измерений и позволяют, в частности, установить область частот нормальной их работы или рабочую полосу пропускания частот.

Рабочей полосой пропускания частот средств измерений называют область частот, в которой отклонение $A(\omega)$ от значения АЧХ при $\omega = 0$ не превышает $\pm 10\%$ (или $\pm 5\%$), а сдвиг по фазе $\varphi(\omega)$ не превышает $30°$ ($\pi/6$, рад). Верхнее значение частоты рабочей полосы пропускания называется граничной частотой $\omega_{гр}$ (рис. 1-6-3).

Для характеристики динамических свойств средств измерений используют ряд параметров, определяемых по переходным характеристикам (функциям). Переходная характеристика представляет собой реакцию динамической системы на единичное ступенчатое воздействие

$$x_{ед}(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leqslant 0, \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

На практике используют ступенчатые воздействия произвольного значения. Переходная характеристика $h(t)$ связана с реакцией линейной динамической системы $y(t)$ на реальное (неединичное) ступенчатое воздействие

$$x(t) = x_0 1(t)$$

простым соотношением

$$h(t) = \frac{y(t)}{x_0},$$

где x_0 — значение произвольного ступенчатого воздействия.

Переходная характеристика $h(t)$ может иметь апериодическую (рис. 1-6-4, *а*) или колебательную (рис. 1-6-4, *б*) формы.

Динамические характеристики линейного средства измерений не зависят от значения и знака ступенчатого возмущения, и переходные характеристики, снятые экспериментально при различных значениях ступенчатых возмущений, должны практически совпадать. Если опыты при различных по значению и знаку ступенчатых возмущениях приводят к неодинаковым количественным и качественным результатам, то это свидетельствует о нелинейности исследуемого средства измерения.

По переходным характеристикам, представленным на рис. 1-6-4, можно определить ряд используемых на практике параметров,

характеризующих динамические свойства данного средства измерений. К ним относятся:

1) время установления показаний (переходного процесса) $t_{у.п}$ — время, по истечении которого выходная величина не выходит из заданной зоны, например $\pm 5\%$ или 1% (на рис. 1-6-4 показана пунктиром) от нового установившегося значения выходной величины $y_{н.у}$ (момент нанесения ступенчатого возмущения отмечен буквой t_0);

2) длительность периода колебаний $T_к$ (рис. 1-6-4, *б*);

3) первый выброс выходной величины (рис. 1-6-4, *б*), определяемый отношением первой амплитуды A_1 колебаний входной величины к нормирующему значению X_N или диапазону измерения;

4) степень затухания $\psi = 1 - A_3/A_1$ (рис. 1-6-4, *б*);

5) постоянная времени T, определяемая как отрезок под касательной, проведенной в точке перегиба $y(t)$ (рис. 1-6-4, *а*);

6) время запаздывания τ;

7) время успокоения.

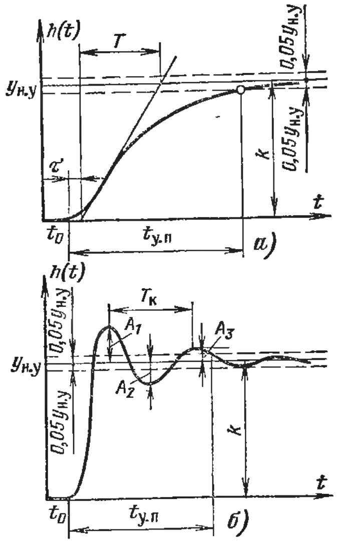


Рис. 1-6-4. Переходные функции средств измерений с апериодической (*а*) и колебательной (*б*) формой переходного процесса.

По переходной характеристике, снятой экспериментально, можно определить передаточную функцию, амплитудно- и фазо-частотные характеристики, представляющие собою аппроксимацию действительных характеристик средств измерений [8—10].

При выборе тех или иных динамических параметров, которыми должны характеризоваться динамические свойства средств измерений, необходимо исходить из назначения средств измерений и условий их применения. Часто используемыми динамическими параметрами средств измерений являются время установления показаний и рабочая полоса пропускания частот с нормированной амплитудой. В некоторых случаях необходимо дополнительно иметь передаточную функцию, например, для средств измерений, используемых в автоматических системах регулирования. Для средств измерений, используемых в схемах защиты и сигнализации, важным динамическим параметром является первый выброс, так как при его большом значении возможно ложное срабатывание защиты. Важной характеристикой для вторичных приборов является характер их успокоения.

Динамические параметры (время установления показаний, рабочая полоса пропускания частот, первый выброс и др.), вводимые в стандарты (нап имер, ГОСТ 7164-71, ГОСТ 14763-69,

ГОСТ 14764-69) и технические условия на средства измерений, позволяют более правильно производить выбор приборов как для технологического контроля, сигнализации и защиты, так и для регулирования.

Следует отметить, что в некоторых случаях динамические свойства средств измерений характеризуются только временем установления показаний (например, пирометров полного излучения).

Динамические свойства термоэлектрических термометров и термометров сопротивления по ГОСТ 6616-74 и ГОСТ 6651-59 характеризуют показателем тепловой инерции ε_∞, который часто называют постоянной времени термометра. Этот показатель фактически представляет собой постоянную времени экспоненциальной переходной характеристики термометра. Определение показателя тепловой инерции ε_∞ производится по методике, приведенной в ГОСТ 6616-74 и ГОСТ 6651-59.

Следует учитывать, что эти динамические параметры дают весьма ограниченную информацию о динамических свойствах средств измерений и каждый из них в отдельности не является достаточным критерием нормирования их динамических свойств.

1-7. Оценка и учет погрешностей при технических измерениях

Под техническими измерениями практически постоянных величин, широко применяемыми в промышленности и в лабораторных условиях, понимаются измерения, выполняемые однократно с помощью рабочих (технических или повышенной точности) средств измерений, градуированных в соответствующих единицах. При выполнении прямых технических измерений однократный отсчет показаний по шкале или диаграмме измерительного прибора принимается за окончательный результат измерения данной величины. Точность результата прямого измерения при применении измерительного показывающего прибора прямого действия может быть оценена приближенной максимальной (или предельной) погрешностью, определяемой по формуле

$$\delta_{п} = \pm(\delta + \delta_{и.п} + \delta_{м}), \tag{1-7-1}$$

где δ — пределы допускаемой основной погрешности применяемого измерительного прибора, % нормирующего значения измеряемой величины; $\delta_{м}$ — методическая погрешность, % значения измеряемой величины; $\delta_{и.п}$ — изменение показаний данного прибора (% нормирующего значения измеряемой величины), вызванное отклонением влияющих величин за пределы, установленные для нормальных значений или для нормальной области значений, согласно формуле

$$\delta_{и.п} = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \delta_{и.п\,i}^2}; \tag{1-7-2}$$

здесь $\delta_{и.п\, i}$ — изменение показаний прибора, вызванное отклонением i-й влияющей величины, %.

При выполнении технических измерений случайные погрешности в большинстве случаев не являются определяющими точность измерения и поэтому отпадает необходимость многократных измерений и вычисления среднего арифметического значения измеряемой величины, так как в пределах допускаемых погрешностей рабочих средств измерений результаты отдельных измерений будут совпадать. Следует также отметить, что технические измерения позволяют выполнять измерения различных величин с наименьшей затратой средств и сил, в наиболее короткий срок и с достаточной точностью.

Для пояснения сказанного выше рассмотрим наиболее простой случай измерения температуры среды с помощью ртутного термометра.

Пример. Для измерения температуры используется ртутный термометр повышенной точности с диапазоном измерения 0—50°С и ценой деления 0,1°С (см. § 3-1). Пределы допускаемой основной погрешности этого термометра составляют ±0,2°С.

При поверке этого термометра в водяном термостате при температуре 40,00°С, контролируемой образцовым термометром, поверяемый термометр показывает 40,10°С. При этой температуре поверяемый термометр имеет систематическую погрешность, равную 40,10—40,00 = +0,10°С. Эта погрешность не превышает предела допускаемой основной погрешности. Если у поверяемого термометра при других температурах в указанном диапазоне измерений систематическая погрешность также не будет превышать предела допускаемой основной погрешности, то поверочное учреждение этот термометр снабдит клеймом и свидетельством с поправками.

При технических измерениях с помощью этого термометра, если отсутствуют погрешности, обусловленные условиями измерения, точность результатов однократных измерений оценивается пределамн допускаемой основной погрешности, т. е. ±0,2°С. Если при измерении температуры такая точность не удовлетворяет, то следует производить многократные измерения, вычислять среднее арифметическое значение измеряемой величины. Для исключения инструментальной погрешности необходимо в результат измерения внести поправку на основании данных свидетельства, выданного поверочным учреждением. В этом случае неточность измерения оценивается средней квадратической погрешностью. По литературным данным средняя квадратическая погрешность для таких термометров составляет ±0,02°С. При технических измерениях эта погрешность не будет являться определяющей.

При применении ртутных термометров широкого применения (см. § 3-1) точность измерений характеризуется только пределом допускаемой основной погрешности (если отсутствуют погрешности, обусловленные условиями измерения), так как эти термометры поправками не снабжаются.

Оценка точности результатов измерений различных величин при применении измерительных систем, состоящих из нескольких средств измерений, рассматривается ниже, например, при измерении температуры (гл. 4).

К техническим измерениям относятся также оперативный контроль и сигнализация, например предупредительная. Оперативный контроль, осуществляемый по показывающим измерительным приборам, преследует цель обеспечить непрерывное наблюдение за пара-

метрами, характеризующими режим работы оборудования и правильность ведения технологического процесса. Задача предупредительной сигнализации — автоматически извещать дежурный персонал об отклонении того или иного параметра от заданного значения. В этих случаях оценка точности информации, выдаваемой средствами измерений, не производится, так как эта информация принимается за действительную. В данном случае должны применяться средства измерений, метрологические характеристики которых отвечают необходимым требованиям по точности.

Для повышения точности технических измерений необходимо обеспечить правильную и тщательную установку средств измерений, а также создавать для них условия работы, близкие к нормальным. Эти мероприятия позволят уменьшить дополнительные погрешности и устранить возможные погрешности, обусловливаемые условиями измерения. Наряду с указанным следует считать необходимым создание преобразователей, первичных и вторичных приборов более высоких классов точности.

Оценка точности результата косвенных технических измерений. До настоящего времени нет математически обоснованного правила для оценки достоверности результата косвенных технических измерений, когда прямые однократные измерения величин $x_1, x_2, \ldots, x_n$ оцениваются не средними квадратическими погрешностями, а допускаемыми погрешностями средств измерения и погрешностями, обусловленными условиями измерения.

Если косвенно измеряемая величина y связана с независимыми друг от друга величинами $x_1, x_2, \ldots, x_n$, измеряемыми прямым однократным способом, функциональной зависимостью

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n), \qquad (1\text{-}7\text{-}3)$$

то очевидно, что предельная погрешность результата косвенного измерения будет слагаться из допускаемых погрешностей и погрешностей, зависящих от условий измерения каждого прямого однократного измерения величин $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

При оценке результата косвенного измерения часто исходят из положения, что при наименее благоприятном случае максимальная абсолютная погрешность результата измерения

$$\Delta y = \pm \left(\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \ldots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \right) = \pm \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|, \qquad (1\text{-}7\text{-}4)$$

где Δx_i — абсолютная предельная погрешность прямого однократного измерения величины x_i ($i = 1 \div n$).

После несложных преобразований выражения (1-7-4) получим уравнение, выражающее относительную максимальную погрешности

ность результата косвенного измерения, %:

$$\delta_y = \pm \frac{\Delta y}{y} 100 = \pm 100 \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|. \qquad (1\text{-}7\text{-}5)$$

Такой способ определения максимальной погрешности результата измерения y, когда y является функцией более чем двух величин x_i, дает завышенное значение Δy или δ_y. Вероятность того, что все суммируемые погрешности величин x_i ($i = 1 \div n$) будут одного знака, например, равна 0,062 при $n = 5$ и 0,002 при $n = 10$.

Вероятность же того, что погрешности прямых однократных измерений величин $x_1, x_2, \ldots, x_n$ будут одного знака и одновременно будут иметь максимальные значения, практически равна нулю.

Так как нельзя ожидать, что указанный выше неблагоприятный случай будет часто встречаться, при оценке точности результата измерения целесообразно производить квадратичное суммирование по формуле

$$\Delta y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \qquad (1\text{-}7\text{-}6)$$

Если непосредственно измеряемые величины являются по своей природе разнородными, то пользуются уравнением

$$\delta_y = \pm 100 \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \qquad (1\text{-}7\text{-}7)$$

Следует отметить, что вероятность максимальных или предельных погрешностей Δy и δ_y результата косвенного измерения не может быть оценена с достаточной достоверностью.

Необходимо отметить, что при действующем способе нормирования метрологических характеристик средств измерений не представляется возможным теоретически обосновано производить оценку погрешности измерений физических величин в реальных условиях эксплуатации. Математическое описание погрешностей средств измерений в соответствии с основными положениями ГОСТ 8.009-72* позволяет теоретически обосновано и с необходимой достоверностью производить оценку погрешности сложных измерительных систем [57].

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУР

2-1. Основные сведения о температуре и температурных шкалах

Температура является одним из важнейших параметров технологических процессов. Она обладает некоторыми принципиальными особенностями, что обусловливает необходимость применения большого количества методов и технических средств для ее измерения.

Температура может быть определена как параметр теплового состояния. Значение этого параметра обусловливается средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела. При соприкосновении двух тел, например газообразных, переход тепла от одного тела к другому будет происходить до тех пор, пока значения средней кинетической энергии поступательного движения молекул этих тел не будут равны. С изменением средней кинетической энергии движения молекул тела изменяется степень его нагретости, а вместе с тем изменяются также физические свойства тела. При данной температуре кинетическая энергия каждой отдельной молекулы тела может значительно отличаться от его средней кинетической энергии. Поэтому понятие температуры является статистическим и применимо только к телу, состоящему из достаточно большого числа молекул; в применении к отдельной молекуле оно бессмысленно.

К пространству со значительно разреженной материей статистические законы неприменимы. Температура в этом случае определяется мощностью потоков лучистой энергии, пронизывающей тело, и равна температуре абсолютно черного тела с такой же мощностью излучения.

Известно, что с развитием науки и техники понятие «температура» расширяется. Например, при исследованиях высокотемпературной плазмы было введено понятие «электронная температура», характеризующее поток электронов в плазме.

Возможность измерять температуру термометром основывается на явлении теплового обмена между телами с различной степенью нагретости и на изменении термометрических (физических) свойств веществ при нагревании. Следовательно, для создания термометра и построения температурной шкалы, казалось бы, возможно выбрать любое термометрическое свойство, характеризующее состояние того или иного вещества и на основании его изменений построить шкалу температур. Однако сделать такой выбор не так легко, так как тер-

мометрическое свойство должно однозначно изменяться с изменением температуры, не зависеть от других факторов и допускать возможность измерения его изменений сравнительно простым и удобным способом. В действительности нет ни одного термометрического свойства, которое бы в полной мере могло удовлетворить этим требованиям во всем интервале измеряемых температур.

Воспользуемся, например, для измерения температуры объемным расширением тел при нагревании и возьмем ртутный и спиртовой термометры обычного типа. Если шкалы их между точками, соответствующими температурам кипения воды и таяния льда при нормальном атмосферном давлении, разделить на 100 равных частей (считая за 0 точку таяния льда), то очевидно, что показания обоих термометров — ртутного и спиртового — будут одинаковы в точках 0 и 100, потому что эти температурные точки были приняты за исходные для получения основного интервала шкалы. Если этими термометрами будем измерять одинаковую температуру какой-либо среды не в этих точках, то показания их будут различны, так как коэффициенты объемного теплового расширения ртути и спирта различно зависят от температуры.

В жидкостно-стеклянных термометрах, применяемых в настоящее время, не приходится сталкиваться с таким расхождением показаний, так как на всех современных термометрах нанесена единая Международная практическая температурная шкала, строящаяся по совершенно другому принципу (способ построения этой шкалы изложен ниже).

Мы встретились бы с теми же затруднениями, если бы попытались осуществить температурную шкалу на основе какой-либо другой физической величины, например электрического сопротивления металлов и т. д.

Таким образом, измеряя температуру по шкале, построенной на произвольном допущении линейной зависимости между свойством термометрического тела и температурой, мы еще не достигаем однозначного численного измерения температур. Поэтому так измеренную температуру (т. е. по объемному расширению некоторых жидкостей, по электрическому сопротивлению металлов и т. д.) обычно называют условной, а шкалу, по которой она измеряется — условной шкалой.

Следует отметить, что из числа старых условных температурных шкал наибольшее распространение получила стоградусная температурная шкала Цельсия, градус которой равен сотой части основного температурного интервала. За основные точки этой шкалы приняты точка плавления льда (0) и точка кипения воды (100) при нормальном атмосферном давлении.

В целях дальнейшего усовершенствования условной температурной шкалы проводились работы по изучению возможности использования для измерения температур газового термометра. Для изготовления газовых термометров воспользовались реальными газами (водородом, гелием и другими) и при этом такими из них, ко-

торые по своим свойствам сравнительно мало отличаются от идеального.

С помощью газового термометра температура может быть измерена по наблюдению либо за изменением давления газа в зависимости от температуры при постоянном объеме, либо за изменением объема газа в зависимости от температуры при постоянном давлении. Как показали всесторонние исследования, большую точность обеспечивает способ, использующий изменения давления газа в зависимости от температуры при постоянном объеме.

Путь к созданию единой температурной шкалы, не связанной с какими-либо частными термометрическими свойствами и пригодной в широком интервале температур, был найден в использовании законов термодинамики. Независимой от свойств термометрического вещества является шкала, основанная на втором законе термодинамики. Она предложена в середине прошлого века Кельвином и получила название термодинамической температурной шкалы.

В основании построения термодинамической температурной шкалы лежат следующие положения. Если в обратимом цикле Карно тело, совершающее цикл, поглощает теплоту Q_1 при температуре T_1 и отдает тепло Q_2 при температуре T_2, то отношение термодинамических (абсолютных) температур T_1/T_2 равно отношению количеств тепла Q_1/Q_2. Согласно положениям термодинамики значение этого отношения не зависит от свойств рабочего тела.

Термодинамическая температурная шкала Кельвина явилась исходной шкалой для построения температурных шкал, не зависящих от свойств термометрического вещества. В этой шкале интервал, заключающийся между точкой таяния льда и точкой кипения воды (для сохранения преемственности со стоградусной температурной шкалой Цельсия), был разделен на 100 равных частей.

Д. И. Менделеев в 1874 г. впервые научно обосновал целесообразность построения термодинамической температурной шкалы не по двум реперным точкам, а по одной. Такая шкала имеет значительные преимущества и позволяет определять термодинамическую температуру точнее, чем шкала с двумя реперными точками.

Однако термодинамическая температурная шкала, являющаяся чисто теоретической, не открывала еще в первое время путей ее практического использования. Для этой цели необходимо было установить связь термодинамической шкалы с реальными приборами для измерения температур. Из числа измерителей температуры наибольшее внимание заслуживают газовые термометры, показания которых могут быть связаны с термодинамической температурной шкалой посредством введения понятия шкалы идеального газа. Термодинамическая шкала, как известно, совпадает со шкалой идеального газа, если принять при нормальном атмосферном давлении точку таяния льда за 0, а точку кипения воды за 100. Этой шкале было присвоено название стоградусной термодинамической температурной шкалы.

Поскольку свойства реальных газов в широком интервале температур сравнительно мало отличаются от свойств идеального газа, поэтому, зная отступления данного газа от законов идеального газа, можно ввести поправки на отклонения данного газового термометра от термодинамической стоградусной температурной шкалы. Таким образом, для получения температурной шкалы, не зависящей от свойств термометрического вещества, необходимо знать поправки к показаниям газовых термометров, для вычисления которых пользуются зависимостями, вытекающими из второго закона термодинамики. Эти поправки относительно невелики и лежат в пределах от 0,001 до 0,5°С.

Однако газовые термометры могут быть использованы для воспроизведения термодинамической стоградусной температурной шкалы только до температур не выше 1200°С, что не может удовлетворить современным требованиям науки и техники. Использование же газовых термометров для более высоких температур встречает большие технические трудности, которые в настоящее время непреодолимы. Кроме того, газовые термометры являются довольно громоздкими и сложными приборами и для повседневных практических целей весьма неудобными. Вследствие этого для более удобного воспроизведения термодинамической стоградусной температурной шкалы в 1927 г. была принята практическая шкала, которая была названа Международной температурной шкалой 1927 г. (МТШ-27).

Положение о МТШ-27, принятое седьмой Генеральной конференцией по мерам и весам как временное, после некоторых уточнений было принято окончательно в 1933 г. восьмой Генеральной конференцией по мерам и весам. В СССР МТШ-27 введена с 1 октября 1934 г. Общесоюзным стандартом (ОСТ ВКС 6954).

МТШ-27 основана на шести постоянных и воспроизводимых температурах фазовых равновесий — реперных точках, которым присвоены определенные числовые значения, и на интерполяционных приборах и формулах, определяющих соотношения между температурой и показаниями этих приборов, градуированных в указанных реперных точках. Числовые значения реперных точек определены с помощью газовых термометров с учетом поправок на отклонение от термодинамической шкалы. Однако числовые значения постоянных точек, полученные в различных метрологических лабораториях ряда стран для одной и той же температуры равновесия, отличались одна от другой, поэтому для каждой температуры равновесия было принято в результате международного соглашения одно наиболее вероятное числовое значение. Вследствие этого МТШ-27 полностью не совпадает с термодинамической и ее следует считать условной, подлежащей пересмотру и исправлению.

В последующие годы производились работы по пересмотру МТШ-27 с целью осуществления более точного согласования с термодинамической шкалой в том виде, как она была принята, но с внесением в нее некоторых улучшений, основанных на уточненных и вновь полученных экспериментальных данных. В результате прове-

денных работ Консультативным комитетом по термометрии был выработан проект Положения о Международной практической температурной шкале 1948 г. (МПТШ-48), утвержденный девятой Генеральной конференцией по мерам и весам.

Для шкалы с одной реперной точкой необходимо приписать определенное числовое значение единственной экспериментально реализуемой ее точке. Нижней границей температурного интервала будет служить тогда точка абсолютного нуля.

Предельная погрешность воспроизведения точки кипения воды составляет 0,01°C, точки таяния льда 0,001°C. Тройная же точка воды, являющаяся точкой равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазе, может быть воспроизведена в специальных сосудах с предельной погрешностью не больше 0,0001°C.

Учитывая все это и рассмотрев тщательно все числовые результаты, полученные в различных метрологических лабораториях ряда стран, Консультативный комитет по термометрии признал, что наилучшим значением для температуры тройной точки воды, лежащей выше точки таяния льда на 0,01°C, является значение 273,16 К. Десятая Генеральная конференция по мерам и весам в 1954 г. на основании этого установила термодинамическую температурную шкалу с одной реперной точкой — тройной точкой воды.

Новое определение термодинамической температурной шкалы нашло отражение в «Положении о МПТШ-48. Редакция 1960 г.», принятом одиннадцатой Генеральной конференцией по мерам и весам. Этой шкалой предусматривается применение двух температурных шкал: термодинамической температурной шкалы и практической температурной шкалы. Температура по каждой из этих шкал может быть выражена двояким способом: в градусах Кельвина (К) и в градусах Цельсия (°C) в зависимости от начала отсчета (положения нуля) по шкале.

Методы реализации МПТШ-48 по существу остались неизменными по сравнению с методами реализации шкалы 1927 г. Однако два изменения в определении шкалы 1948 г. дают ощутимые различия в числовом значении измеряемых температур. Для температуры затвердевания серебра предложено значение 960,8°C вместо ранее установленного 960,5°C. Воспроизведение области шкалы выше точки затвердевания золота (1063°C) предложено осуществлять не по приближенной формуле Вина, а по уравнению Планка. Кроме того, предложено уточненное значение константы излучения c_2, входящей в уравнение Планка.

Участок шкалы от −182,97°C до +630,5°C, определяемый эталонным термометром сопротивления, остается в основном без изменений. В интервале от 630,5 до 1063°C числовые значения температуры по уточненной шкале 1948 г. немного выше таковых по шкале 1927 г. Благодаря этому изменению участок шкалы, определяемый эталонным термоэлектрическим термометром, согласуется более надежно не только с участком шкалы, определяемым термометром сопротивления в точке затвердевания сурьмы, но также с областью

шкалы выше точки затвердевания золота при применении уточненного значения c_2. В СССР МПТШ-48 была введена с 1 июля 1962 г. (ГОСТ 8550-61).

Ввиду большой потребности в измерениях низких температур как в научных исследованиях, так и в технике, длительное время в ряде стран велись работы по установлению температурных шкал ниже 90 К. Исследования в этой области низких температур, выполненные в СССР и других странах, рассмотрены в монографии М. П. Орловой [13]. На базе этих работ в ряде стран были установлены национальные шкалы в области 13,8—90 К. В СССР практическая температурная шкала в области от тройной точки водорода до точки кипения кислорода введена с 1/VII 1967 г. (ГОСТ 12442-66). Для реализации практических температурных шкал, воспроизводящих единицу температуры в интервалах от 1,5 до 4,2 К и от 4,2 до 13,81 К, во ВНИИФТРИ были созданы [13], а Госстандартом СССР утверждены Государственные специальные эталоны единиц температуры для диапазонов от 1,5 до 4,2 К и от 4,2 до 13,81 К (ГОСТ 8.078-73 и ГОСТ 8.084-73). В настоящее время в применяемых в СССР практических температурных шкалах область низких температур расширена до 0,01 К (см. § 2-2).

Одновременно с проведением исследований в области низких температур проводились работы по пересмотру МПТШ-48 (Редакция 1960 г.).

Международным комитетом мер и весов в октябре 1968 г. была принята новая Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68). В ней (§ 2-2) расширена область низких температур до тройной точки водорода и произведены уточнения шкалы МПТШ-48 в области от —182,97 до 1063°С.

В зарубежной литературе наряду с выражением температуры в кельвинах (К) и градусах Цельсия (°С) используется иногда градус Фаренгейта (°F) и градус Ренкина (°Ra). Следует иметь в виду, что раньше градус Фаренгейта был характерен для шкал ртутно-стеклянных термометров, а в данное время, так же как и градус Цельсия, он обозначает, что температура выражена по МПТШ, но с другим числовым значением. Пересчет числовых значений температуры, выраженной в градусах одной шкалы, в градусы другой производят по следующим формулам:

$$n\,^\circ\mathrm{C} = n\mathrm{K} - 273{,}15 = \frac{5}{9}(n\,^\circ\mathrm{F} - 32) = \frac{5}{9}n\,^\circ\mathrm{Ra} - 273{,}15;$$

$$n\mathrm{K} = n\,^\circ\mathrm{C} + 273{,}15 = \frac{5}{9}n\,^\circ\mathrm{F} + 255{,}37 = \frac{5}{9}n\,^\circ\mathrm{Ra}.$$

2-2. Практические температурные шкалы

В СССР с 1/I 1976 г. установлены практические температурные шкалы, предназначенные для обеспечения единства измерений температуры от 0,01 до 100 000 К, и методы их осуществления

(ГОСТ 8.157-75). Эти температурные шкалы установлены с учетом рекомендации Международного комитета мер и весов и его Консультативного комитета по термометрии.

Рассматриваемые ниже практические температурные шкалы образуют единую систему температурных шкал, непрерывную от 0,01 до $1 \cdot 10^5$ К, реализуемых различными методами. При этом они установлены таким образом, что температуры, измеренные по ним, близки к термодинамическим температурам.

Единицей температуры по практическим температурным шкалам, установленным ГОСТ 8.157-75, так же как и единицей термодинамической температуры, является кельвин (К), вместо прежнего наименования градус Кельвина. Допускается применение единицы температуры — градус Цельсия (°С). Между температурой T, выраженной в кельвинах, и температурой t, выраженной в градусах Цельсия, установлено соотношение

$$t = T - T_0, \qquad (2\text{-}2\text{-}1)$$

где $T_0 = 273{,}15$ К.

Единица кельвин определена как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды. Градус Цельсия равен кельвину. Температурные разности (интервалы) выражаются в кельвинах, но могут быть выражены также в градусах Цельсия вместо ранее применявшегося обозначения град (*deg*).

Методы воспроизведения практических температурных шкал, рассматриваемых ниже, определяют требования к средствам измерений, входящим в состав государственных эталонов для соответствующих диапазонов температуры.

Температурная шкала термометра магнитной восприимчивости ТШТМВ. Эта температурная шкала, основанная на зависимости магнитной восприимчивости χ термометра из церий-магниевого нитрата от температуры T, устанавливается для диапазона температур от 0,01 до 0,8 К. Зависимость $\chi = f(T)$ выражается законом Кюри:

$$\chi = C/T, \qquad (2\text{-}2\text{-}2)$$

где C — константа, определяемая градуировкой магнитного термометра.

Температурная шкала ^{3}He 1962 г. Эта шкала, основанная на зависимости давления p насыщенных паров изотопа гелия -3 от температуры T, устанавливается для диапазона температур от 0,8 до 1,5 К. Эта зависимость выражается уравнением

$$\ln p = 2{,}24846 - \frac{2{,}49174}{T} + 4{,}80386 - \\ - 0{,}286001T + 0{,}198608T^2 - 0{,}0502237T^3 + 0{,}00505486T^4, \qquad (2\text{-}2\text{-}3)$$

где p — давление в мм рт. ст. при 0°С и ускорении свободного падения, равном 9,80665 м/с².

Температурная шкала ^{4}He 1958 г., основанная на зависимости давления p насыщенных паров изотопа гелия-4 от температуры T,

устанавливается для диапазона температур от 1,5 до 4,2 К. Эта зависимость представлена в табличной форме (ГОСТ 8.157-75).

Температурная шкала германиевого термометра сопротивления ТШГТС. Шкала ТШГТС, основанная на зависимости электрического сопротивления R германиевого термометра от температуры T, устанавливается для диапазона температур от 4,2 до 13,81 К. Зависимость $R = f(T)$ выражается соотношением

$$\lg R = \sum_{i=0}^{i=8} A_i (\lg T)^i, \tag{2-2-4}$$

где A_i — константы, определяемые градуировкой германиевого термометра сопротивления по газовому термометру.

Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) устанавливается для температур от 13,81 до 6300 К. Температурная шкала МПТШ-68 основана на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым присвоены точные значения температур — основных реперных (постоянных) точек, и на эталонных приборах, градуированных при этих температурах. В интервалах между температурами постоянных точек интерполяцию осуществляют по формулам, устанавливающим связь между показателями эталонных приборов и значениями температуры. Основные реперные точки реализуются как определенные состояния фазовых равновесий некоторых чистых веществ. Равновесные состояния и приписанные им значения температуры приведены в табл. 2-2-1.

Для температур от 13,81 до 903,89 К (от — 259,34 до 630,74°С) в качестве эталонного прибора применяют платиновый термометр сопротивления. Для области температур ниже 0°С соотношение между сопротивлением термометра и температурой определяют стандартной функцией и специальными уравнениями для вычисления поправок к этой функции согласно ГОСТ 8.157-75. Для области от 0 до 630,74°С соотношение между сопротивлением термометра и температурой выражается двумя уравнениями в форме полиномов (гл. 5).

Для температур от 630,74 до 1064,43°С в качестве эталонного прибора применяют термоэлектрический термометр с электродами из платинородия (10% родия) и платины. Соотношение между термо-э. д. с. и температурой выражается уравнением второй степени (гл. 4).

Для температур от 1337,58 К до 6300 К (от 1064,43 до 6026,85°С) температуру определяют в соответствии с законом излучения Планка (гл. 7).

Температурная шкала пирометра микроволнового излучения (ТШПМИ). ТШПМИ, основанная на зависимости спектральной плотности энергии излучения $L(T)$ черного тела от температуры T в микроволновом диапазоне излучения, устанавливается для диапазона температур от 6300 до 100 000 К. Эта зависимость выражается уравнением

$$L(T)/L[T(\mathrm{Au})] = T/T(\mathrm{Au}), \tag{2-2-5}$$

Таблица 2-2-1

Основные реперные (постоянные) точки МПТШ-68

Состояние фазового равновесия	Значение температуры	
	К	°С
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81	—259,34
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33,330 кПа (250 мм рт. ст.)	17,042	—256,108
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28	—252,87
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102	—246,048
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	—218,789
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188	—182,962
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43

Примечания: 1. Значения температур даны для состояния равновесия при давлении p, равном 101,325 кПа (760 мм рт. ст.), за исключением тройных точек и точки 17,042 К.

2. Состояние равновесия между твердой и жидкой фазами олова (точка затвердевания олова) имеет значение $t = 231,9681$°С и может быть использовано вместо точки кипения воды.

где $L(T)$ и $L[T(\mathrm{Au})]$ — спектральная плотность энергии излучения черного тела в диапазоне микроволнового радиоизлучения при температуре T и в точке затвердевания золота $T(\mathrm{Au})$.

Для построения температурной шкалы по микроволновому излучению используют тепловое излучение с длинами волн более 1 мм.

Передача размера единицы температуры, а вместе с тем и практических температурных шкал от эталонов образцовым средствам измерений и от них рабочим средствам измерений с указанием погрешностей, производится в соответствии с поверочными схемами (ГОСТ 8.082-73, ГОСТ 8.083-73 и др.). В поверочных схемах указаны также основные методы поверки средств измерений температуры.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ТЕРМОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА РАСШИРЕНИИ И ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА

3-1. Термометры стеклянные жидкостные

Основные сведения. Термометры стеклянные жидкостные применяются для измерения температур в области от —200 до +750°С. Несмотря на то, что кроме стеклянных жидкостных термометров имеется ряд других приборов для измерения температур, удовлетворяющих в большой степени требованиям современной техники контроля технологических процессов, все же стеклянные термометры получили большое распространение как в лабораторной, так и в промышленной практике вследствие простоты обращения, достаточно высокой точности измерения и низкой стоимости.

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре. При этом, очевидно, показания жидкостного термометра зависят не только от изменения объема термометрической жидкости, но также и от изменения объема стеклянного резервуара, в котором находится эта жидкость. Таким образом, наблюдаемое (видимое) изменение объема жидкости преуменьшено на размер, соответственно равный увеличению объема резервуара (и частично капилляра).

Для заполнения жидкостных термометров применяют ртуть, толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан и т. д. Область их применения, а также значения коэффициентов действительного и видимого расширения жидкостей приведены в табл. 3-1-1.

Из жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные. Они обладают рядом преимуществ благодаря существенным достоинствам ртути, которая не смачивает стекла, сравнительно легко получается в химически чистом виде и при нормальном атмосферном давлении остается жидкой в широком интервале температур (от —38,87 до +356,58° С). Следует также отметить,

что давление насыщенных паров ртути при температуре, превышающей 356,58° С, невелико по сравнению с давлением насыщенных паров других жидкостей. Это дает возможность относительно небольшим увеличением давления над ртутью в капилляре заметно повысить ее температуру кипения, а вместе с тем и расширить температурный интервал применения ртутных термометров.

Таблица 3-1-1

Термометрические жидкости

Жидкость	Возможные пределы применения, °C		Средний коэффициент объемного теплового расширения, K^{-1}	
	нижний	верхний	действительный	видимый
Ртуть	—35	750	0,00018	0,00016
Толуол	—90	200	0,00109	0,00107
Этиловый спирт	—80	70	0,00105	0,00103
Керосин	—60	300	0,00095	0,00093
Петролейный эфир	—120	25	0,00152	0,00150
Пентан	—200	20	0,00092	0,00090

Примечания: 1. Коэффициент видимого расширения ртути в термометрическом боросиликатном стекле составляет 0,000164 K^{-1}, а в кварцевом стекле 0,00018 K^{-1}.
2. Под видимым коэффициентом объемного теплового расширения понимают разность между коэффициентами объемного теплового расширения термометрической жидкости и стекла.

К числу недостатков ртути с точки зрения термометрии следует отнести сравнительно малый коэффициент расширения (табл. 3-1-1).

При измерении температуры термометрами, заполненными органическими жидкостями, необходимо иметь в виду, что они смачивают стекло, а вследствие этого понижается точность отсчета показаний.

Термометры в зависимости от назначения и диапазона измерений температур изготовляют из стекла различных марок (ГОСТ 1224-71).

Термометры стеклянные жидкостные по назначению и области применения могут быть разделены на следующие группы: образцовые; лабораторные и специального назначения (ГОСТ 215-57, ГОСТ 13646-68 и ГОСТ 5.1851-73); технические (ГОСТ 2823-73); метеорологические; термометры для сельского хозяйства; термометры бытовые. Ниже будут рассмотрены термометры, применяемые как в лабораторных, так и промышленных условиях.

Стеклянные жидкостные термометры, применяемые в технике, бывают следующих разновидностей:

1. Термометры, применяющиеся без введения поправок к их показаниям (термометры широкого применения): а) ртутные термометры (от —35 до + 600°С); б) жидкостные термометры с органическим наполнителем (от —185 до + 300°С).

2. Термометры, к показаниям которых вводятся поправки согласно свидетельству: а) ртутные термометры повышенной точности (от —35 до + 600°С); б) ртутные термометры для точных измерений (от 0 до 500°С); в) жидкостные термометры с органическим наполнителем (от —80 до + 100°С).

В качестве образцовых применяются следующие термометры: (ГОСТ 8.083-73): ртутные равноделенные 1-го разряда с диапазоном измерений 0—600°С (доверительная погрешность $\Delta = 2\sigma = 0{,}002 \div 0{,}2$°С); ртутные переменного наполнения 2-го разряда с диапазоном измерений 0—150°С (доверительная погрешность $\Delta = 2\sigma = 0{,}004 \div 0{,}1$°С); ртутные 2-го разряда с диапазоном измерений 0—600°С (доверительная погрешность $\Delta = 2\sigma = 0{,}01 \div 1{,}0$°С); ртутные 3-го разряда с диапазоном измерений 0—600°С (доверительная погрешность $\Delta = 2\sigma = 0{,}03 \div 3{,}0$°С).

Конструктивные формы стеклянных жидкостных термометров разнообразны, однако среди этого разнообразия можно выбрать два основных типа конструкций: палочные и со вложенной шкалой.

Палочные термометры имеют массивный (толстостенный) капилляр с внешним диаметром 6—8 мм, почти равным диаметру резервуара. Шкала у этих термометров наносится непосредственно на внешней поверхности капилляра (рис. 3-1-1, *а*).

Характерной особенностью второй конструкции является то, что шкала сделана не на капилляре, а на прямоугольной пластине из стекла молочного цвета, помещенной позади капиллярной трубки, припаянной к резервуару цилиндрической формы. Кроме того, к резервуару припаяна защитная стеклянная оболочка, в которой и находится как капилляр, так и шкальная пластина (рис. 3-1-1, *б*).

Термометры со вложенной шкалой обладают большей инерционностью, чем палочные, но они более удобны для наблюдения при измерении температур в лабораторных и производственных условиях.

У ртутных термометров с пределом измерения выше 200° С пространство над ртутным столбиком в капилляре заполняется сухим газом (например, азотом) под давлением. При этом давление газа должно быть тем выше, чем больше верхний предел измерения, что обусловливается необходимостью исключить парообразование ртути в резервуаре при высоких температурах. В ртут-

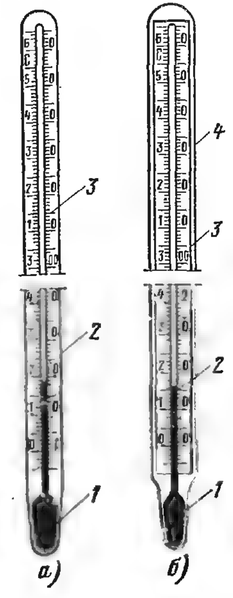


Рис. 3-1-1. Термометры.

а — палочный: *1* — резервуар; *2* — толстостенный капилляр; *3* — шкала, нанесенная на внешней поверхности капилляра; *б* — со вложенной шкалой: *1* — резервуар; *2* — капилляр; *3* — шкала, нанесенная на пластине из молочного стекла; *4* — защитная стеклянная оболочка.

ных термометрах, предназначенных для измерения температуры до 500°С, давление газа достигает свыше 20 кгс/см² (2 МПа). Ртутные термометры, имеющие верхний предел измерения до 200°С, в зависимости от их назначения могут быть вакуумными или заполненными сухим газом (ГОСТ 2045-43). Термометры ртутные, предназначенные для точных измерений, с верхними пределами измерения до 105°С изготовляют вакуумными, а выше 105°С — газонаполненными (ГОСТ 13646-68).

Термометры жидкостные (нертутные) изготовляют согласно установленным техническим требованиям в государственных стандартах (ГОСТ 9177-59 и др.).

В зависимости от метода градуировки и применения стеклянные жидкостные термометры делятся на две группы: термометры, градуируемые и применяемые при полном погружении; термометры, градуируемые и применяемые при неполном погружении. К первой группе относятся термометры, погружаемые в среду, температура которой измеряется до отсчитываемого деления. Таким образом, по мере повышения измеряемой температуры глубина погружения термометра как при градуировке, так и при измерении должна увеличиваться. Термометры второй группы должны при градуировке и при измерении иметь фиксированную глубину погружения, указанную на термометре. Поэтому при применении этих термометров всегда имеется часть капилляра с термометрической жидкостью, не погруженная в среду, температура которой измеряется. Вследствие этого выступающий столбик термометрической жидкости термометра имеет температуру, отличную от измеряемой и близкую к температуре окружающего воздуха.

Термометры лабораторные широкого применения изготовляют в большинстве случаев со вложенной шкалой (рис. 3-1-1, *б*), но их выпускают также и палочными (рис. 3-1-1, *а*). При применении этих термометров они должны погружаться в среду, температура которой измеряется на глубину, обозначенную на термометре. Если указание о глубине погружения на термометре отсутствует, то термометр при измерении температуры или его поверке погружается до отсчитываемого деления. Допускаемые погрешности показаний лабораторных термометров широкого применения нормируются в зависимости от цены деления и температурного интервала шкалы.

Термометры повышенной точности для повышения точности отсчета и для удобства пользования изготовляют узкопредельными, т. е. с укороченной шкалой. Термометры этого типа бывают как со вложенной шкалой (рис. 3-1-2), так и палочные. Термометры узкопредельные повышенной точности выпускаются с ценой деления 0,1°С и температурным интервалом шкалы 50°С. Они изготовляются в нескольких вариантах по пределам измерения температур от —30 до 350°С. Если нижний предел измерения термометра выше 0°С, то нулевую точку наносят на вспомогательную шкалу, имеющую несколько отметок выше и ниже нулевой. Нулевая отметка

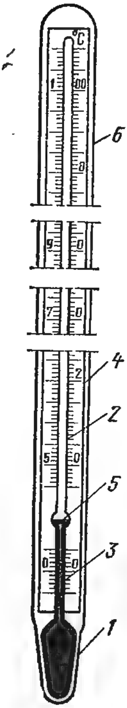


Рис. 3-1-2. Термометр с укороченной шкалой.

1 — резервуар; *2* — капилляр; *3* — вспомогательная шкала; *4* — основная шкала; *5* — расширенная часть капилляра; *6* — защитная оболочка.

обеспечивает систематический контроль за постоянством показаний термометра. Между вспомогательной шкалой и отметкой, соответствующей нижнему пределу основной шкалы, капилляр имеет расширение. Объем этого расширения равен приращению объема жидкости при нагревании термометра от нулевой отметки до температуры, соответствующей нижнему пределу основной шкалы.

Допускаемые погрешности показаний термометров повышенной точности нормируются в зависимости от их цены деления и температурного интервала шкалы.

Лабораторные ртутные термометры ТР-I, ТР-II, ТР-III, ТР-IV, предназначенные для точных измерений температуры от 0 до 500°С выпускают узкопредельные (с укороченной шкалой). Эти термометры, выполняемые с равноделенной шкалой, изготовляют по ГОСТ 13646-68 и ГОСТ 5.1851-73 с различной ценой деления и температурными интервалами шкалы. Основные технические характеристики ртутных термометров для точных измерений температуры приведены в табл. 3-1-2.

Поправки к показаниям термометров (табл. 3-1-2), приведенные к давлению 755—765 мм рт. ст. и определенные для вертикального положения термометров на нулевой точке, не должны превышать ± 0,03°С для термометров типа ТР-I; ± 0,06°С для термометров типа ТР-II; ± 0,15°С для ТР-III и ± 0,3°С — для ТР-IV.

Таблица 3-1-2

Основные технические характеристики ртутных термометров для точных измерений

Тип термометра	Область измерений, °С	Диапазон измерений, °С	Цена деления шкалы, °С	Количество термометров в данном типе
ТР-I	0—60	4	0,01	15
ТР-II	55—155	10	0,02	10
ТР-III	140—300	20	0,05	8
ТР-IV	300—500	50	0,1	4

Погрешность измерений термометров с учетом введения поправок не должна превышать ± 0,01°С для термометров типа ТР-I; ± 0,02°С для ТР-II; ± 0,05 для ТР-III и ± 0,1°С — ТР-IV.

Лабораторные ртутные термометры этих типов снабжаются инструкцией по эксплуатации и свидетельством, в котором приводятся: поправки к показаниям термометров, положение нулевой

точки, поправки на калибр, коэффициент внешнего давления в °С/мм рт. ст. (для определения поправки к показаниям термометров при атмосферном давлении менее 755 и более 765 мм рт. ст), коэффициент внутреннего давления в °С/мм рт. ст. (для введения поправки к показаниям термометров при измерении температур термометрами, находящимися в горизонтальном положении), средняя цена деления шкалы, определяемая при вертикальном положении термометра, в °С.

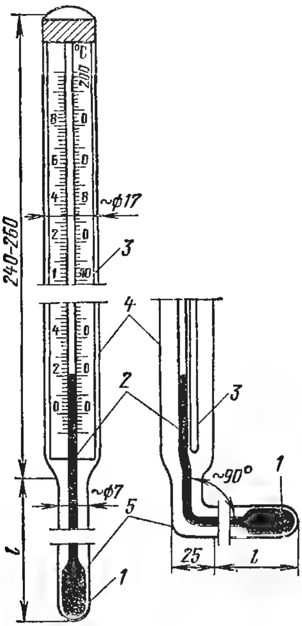


Рис. 3-1-3. Технические термометры.

1 — резервуар; *2* — капилляр; *3* — шкала; *4* — оболочка; *5* — нижняя часть термометра (*l*).

Изготовляются также лабораторные ртутные термометры специального назначения, которые применяются при измерении температур в какой-то одной определенной области. К этой группе относятся калориметрические и метастатические (переменного наполнения) термометры.

Калориметрические ртутные термометры служат для измерения в области комнатных температур небольших разностей их (от 0,5 до 5°С) при калориметрических работах по определению теплотворной способности топлива или теплоемкости тел. При таких измерениях необходимо, чтобы погрешность измерения разности температур была не более 0,001°С. Вследствие этого калориметрические термометры, имеющие укороченную шкалу, изготовляют с ценой деления 0,01 или 0,02°С и температурным интервалом шкалы 15—25°С (или 17—25°С). Эти термометры рассчитаны на применение при неполном погружении.

Метастатические термометры позволяют измерять небольшие разности температур (до 5—6°С) в широком интервале температурной шкалы от —20 или от 0 до 150°С с погрешностью 0,004—0,1°С. Устройство метастатических термометров рассматривается в инструкции по эксплуатации.

Технические термометры. Ртутные технические термометры предназначены для области измерений температур от —30 до +600°С, а термометры с органической жидкостью от —90 до +30°С и от —60 до + 200°С. Их изготовляют только со вложенной шкалой (рис. 3-1-3); прямыми и угловыми (изогнутыми под углом 90°); нижняя часть выполняется различной длины (от 66 до 2000 мм).

Технические термометры градуируются и поверяются при погружении всей нижней части *l*, поэтому при измерении в эксплуатационных условиях нижняя часть *l* термометра погружается в среду,

температура которой измеряется, полностью. При выборе шкалы технических термометров необходимо одновременно выбрать длину и форму нижней его части. Пределы допускаемых погрешностей показаний термометров устанавливаются в зависимости от диапазона измерений температур, цены деления и термометрической жидкости.

Технические термометры электроконтактные. Термометры ртутные электроконтактные применяются для целей сигнализации и регулирования (в простейших схемах) температуры в лабораторных и промышленных условиях. Электроконтактные термометры изготовляют с постоянными впаянными контактами или с одним подвижным контактом, который можно перемещать внутри капилляра при помощи специального магнитного устройства (настройка термометра), и вторым неподвижным контактом, впаянным в капилляр термометра. Замыкание (размыкание) электрической цепи между контактами в том и другом случаях происходит вследствие расширения (сжатия) ртути при нагревании (охлаждении) нижней части термометра. Пространство над ртутью в капилляре заполняют водородом, предварительно очищенным от влаги и кислорода.

Электроконтактные термометры, рассматриваемые ниже, могут работать в цепях постоянного и переменного тока. Определение действительного значения температуры контактирования и контроль за правильностью поддержания температуры должны осуществляться по контрольному термометру.

Термометры электроконтактные стандартные изготовляются прямые и угловые — изогнутые под углом 90°. При установке термометров непосредственно в аппаратах, агрегатах, трубопроводах и т. п. во избежание поломок рекомендуется заключать их в защитную оправу.

На рис. 3-1-4 показан термометр ртутный электроконтактный типа ТЭК со вложенной шкалой и постоянными впаянными в капилляр металлическими контактами, к которым припаяны медные провода, присоединенные к зажимам, смонтированным на корпусе термометра. Количество заданных температур контактирования для термометров типа ТЭК в интервале температур от —35 до +300° С может быть одно (рис. 3-1-4), два или три. Контакты впаиваются в капилляр рмометра в местах, соответствующих определенным значениям температур контактирования, которые задаются в зависимости от требований технологического процесса. Минимальные интервалы между двумя соседними контактами обычно выполняются не менее 5, 10, 20 и 30° С для температур контактирования соответственно до 50, 100, 200 и 300° С.

Допускаемая погрешность показаний по шкале термометра типа ТЭК не должна превышать цены наименьшего деления. При применении этих термометров нижня часть его l погружается в среду, температура которой контролируется полностью. Поэтому при выборе шкалы термометра типа ТЭК, а вместе с тем и температуры контактирования необходимо одновременно выбирать длину и форму нижней его части.

Рассмотрим электроконтактный ртутный термометр с магнитной перестановкой контакта типа ТПК (рис. 3-1-5). Он имеет две шкалы — верхнюю и нижнюю. Верхняя вспомогательная шкала нанесена на шкальной пластине вдоль овальной стеклянной трубки *1*, припаянной к капилляру *2*. Указателем этой шкалы при настройке термометра является овальная гайка *3*, которая может перемещаться по микровинту *4* вверх и вниз. Верхний конец микровинта жестко

соединен со стальным цилиндрическим якорем *5*, а нижний его конец опирается на подпятник *6*. Вращение якоря и микровинта, а вместе с тем и перемещение овальной гайки по последнему осуществляется с помощью постоянного магнита *7*, установленного на колпачке *8*, который надет на стеклянную трубку, припаянную к овальной трубке *1*.

Термометр имеет один неподвижный и один подвижный контакт. Неподвижный контакт *9*, соединенный с медным проводом *10*, впаян в капилляр ниже нулевой отметки основной шкалы. Подвижный контакт *11* выполнен из тонкой вольфрамовой проволоки, верхний конец которой закреплен в овальной гайке *3*. Этот контакт соединен с медным проводом *12* через следующие переходы: подвижный контакт — подпятник; подпятник — выводной проводник, впаянный в овальную трубку; выводной проводник — медный провод *12*. Нижняя часть вольфрамовой проволоки проходит через отверстие в подпятнике, далее соприкасается с выводным проводником, припаянным к подпятнику, и затем проходит через отверстие направляющей стеклянной втулки *13*, впаянной в расширенную часть капилляра. Таким образом, нижний конец вольфрамовой проволоки, находящийся в измерительном капилляре, является подвижным контактом термометра. Если овальная гайка будет передвинута по микровинту с помощью магнита на определенную отметку верхней шкалы, то нижний конец вольфрамовой проволоки (подвижный контакт) будет установлен против соответствующей отметки нижней основной шкалы. При нагревании (охлаждении) нижней части термометра до заданной температуры ртуть в капилляре соединит (разомкнет) нижний контакт с подвижным контактом.

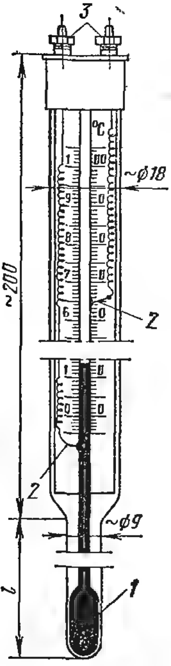


Рис. 3-1-4.

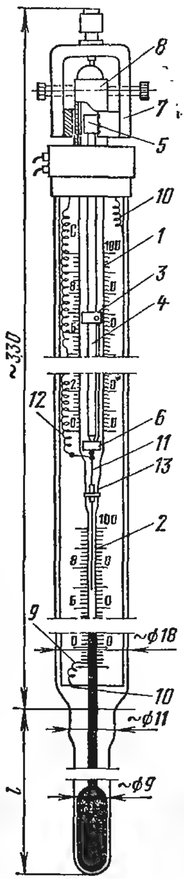


Рис. 3-1-5.

Рис. 3-1-4. Термометр ртутный электроконтактный типа ТЭК.

1 — нижняя часть термометра (l); 2 — металлические контакты, впаянные в капилляр; 3 — зажимы, соединенные с помощью проводников с контактами.

Рис. 3-1-5. Термометр ртутный электроконтактный типа ТПК.

Допускаемые отклонения от отсчета по шкале электроконтактного термометра типа ТПК при его настройке не должны превышать цены наименьшего деления. При применении электроконтактных термометров нижняя его часть *l* погружается в среду, температура которой контролируется, полностью. Кроме того, при выборе шкалы термометра и интервала температур контактирования необходимо одновременно выбрать форму и длину нижней части.

Для электроконтактных термометров типа ТПК применяют универсальные реле, работающие при напряжении 24, 48 и 110 В постоянного тока и 36, 110, 127 и 220 В переменного тока; при этом нагрузка на контактах термометра не должна превышать 0,5 мА при напряжении не больше 0,3 В.

Применяются также электроконтактные ртутные термометры палочные бесшкальные. Они имеют два металлических контакта, впаянных в толстостенный

капилляр в местах, соответствующих определенным значениям температур контактирования, которые задаются в зависимости от требований технологического процесса. Например, температура контактирования для термометров, предназначенных для сигнализации температуры подшипников двигателей и других машин, выбирается обычно равной 65°C.

За верхним контактом термометр имеет запасную длину капилляра, допускающую увеличение объема ртути при повышении температуры выше контактируемой на 20°C. Электроконтактные палочные термометры могут работать в цепях постоянного и переменного тока. Допускаемая разрывная мощность контактов не должна превышать 2 Вт при силе тока не более 0,2 А.

Смещение нулевой точки. Стекло относится к материалам, обладающим значительным термическим последействием. Вследствие этого при охлаждении после временного нагрева резервуар термометра не сразу принимает тот объем, который соответствовал первоначальной температуре. Кроме того, в стекле в течение долгого времени после того, как оно было нагрето до размягчения, происходят молекулярные перемещения, в результате чего объем резервуара вновь изготовленного термометра уменьшается очень медленно. Такое явление называется естественным старением. Это приводит к постепенному смещению нулевой точки. Последнее может быть в значительной степени уменьшено искусственным старением, т. е. продолжительным нагревом (отжигом) термометра до температуры, соответствующей верхнему пределу шкалы, с постепенным охлаждением его до температуры воздуха в помещении.

Поэтому при применении точных и повышенной точности лабораторных термометров рекомендуется производить поверку нулевой точки. При этом перед поверкой термометр должен быть нагрет до температуры, соответствующей верхнему значению его шкалы. Если положение нулевой точки изменится против указанного в свидетельстве и будет в пределах допускаемой погрешности, то ко всем поправкам в свидетельстве надо алгебраически добавить значение Δt:

$$\Delta t = t_0 - t'_0, \tag{3-1-1}$$

где t_0 — положение нулевой точки, указанное в свидетельстве; t'_0 — положение нулевой точки, вновь найденное опытным путем.

Пример. Поправка в свидетельстве, относящаяся к 300°C, равна −0,2°C, положение нулевой точки $t_0 = -0{,}1$°C. Положение нулевой точки, вновь найденное, $t'_0 = +0{,}1$°C. Согласно (3-1-1)

$$\Delta t = -0{,}1 - (+0{,}1) = -0{,}2\ ^\circ\mathrm{C}.$$

Новая поправка в точке 300°C будет равна:

$$-0{,}2 + (-0{,}2) = -0{,}4^\circ\mathrm{C}.$$

Введение поправок в показания термометра. Если при измерении температуры лабораторный термометр, предназначенный для полного погружения, не может быть погружен в среду, температура которой измеряется, до отсчитываемого деления, то следует вводить поправку в его показания на выступающий столб. Эта поправка указывает, насколько показания термометра меньше (или больше) той температуры, которую термометр показал бы

при погружении в среду до отсчитываемого деления. При поверке термометры такого типа погружаются в среду, заполняющую термостат, до отсчитываемого деления. Следовательно, вся заполняющая резервуар и капилляр термометрическая жидкость находится при температуре среды. Выступающий столбик термометра при измерении имеет другую температуру, поэтому и приходится вносить поправку в показания термометра.

Среднюю температуру выступающего столбика обычно измеряют с помощью вспомогательного палочного термометра, резервуар которого прижимается к основному термометру в середине выступающей части столба. При этом вспомогательный термометр должен быть хорошо закреплен и изолирован асбестовым шнуром, как показано на рис. 3-1-6. Вспомогательный палочный термометр рекомендуется брать малых размеров.

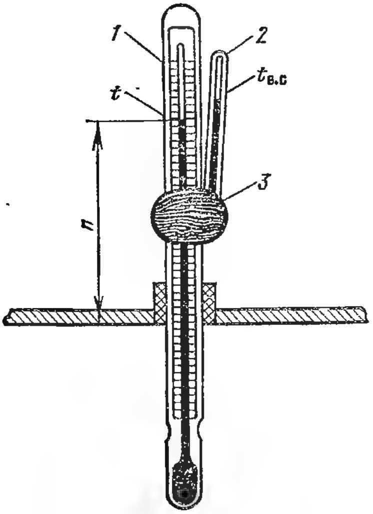


Рис. 3-1-6.
Измерение температуры выступающего столбика лабораторного термометра.
1 — лабораторный термометр; *2* — вспомогательный термометр; *3* — асбестовый шнур.

Поправка на выступающий столбик, °C, может быть подсчитана по формуле

$$\Delta t = n\beta\,(t - t_{в.с}), \qquad (3\text{-}1\text{-}2)$$

где n — высота выступающего столба, выраженная в делениях шкалы термометра; β — коэффициент видимого расширения (табл. 3-1-1); t — температура, показываемая лабораторным термометром, °C; $t_{в.с}$ — средняя температура выступающего столба, °C.

Следует отметить, что рассмотренный способ измерения средней температуры выступающего столбика является приближенным. Поэтому поправка, как правило, может быть определена с погрешностью не менее ± 10% вследствие трудности измерения средней температуры выступающего столбика. При высоких требованиях к точности измерения лучшим решением вопроса, когда термометр не может быть погружен до отсчитываемого деления в среду, температура которой измеряется, является замена жидкостного стеклянного термометра термометром сопротивления повышенной точности (см. гл. 5).

Пример. Лабораторный ртутный термометр, погруженный до отметки 200°C, показывает 300°C, причем температура $t_{в.с}$, показываемая вспомогательным термометром, равна 40°C. Поправка на выступающий столб в этом случае равна:

$$\Delta t = n\beta\,(t - t_{в.с}) = 100 \cdot 0{,}00016\,(300 - 40) \approx 4{,}2 \approx 4°C.$$

Исправленное показание термометра равно 300 + 4 = 304°C.

При измерении температуры ртутным термометром повышенной точности с диапазоном измерения 0—50°C и ценой деления 0,1°C точность результата измерения (погрешности, обусловленные условиями измерения, отсутствуют) оценивается допускаемой погрешностью термометра, т. е. ±0,2°C. Если при измерении температуры такая точность не удовлетворяет, то следует производить многократные измерения, вычислять среднее арифметическое значение результатов наблюдения (§ 1-4). Для исключения систематической (инструментальной) погрешности необходимо в результаты измерения ввести поправку на основании данных свидетельства, выданного поверочным учреждением. В этом случае неточность результата измерения оценивается средней квадратической погрешностью. По опытным данным средняя квадратическая погрешность в этом случае составляет 0,02°C.

Термометры технические обычно градуируются при постоянной глубине погружения нижней его части. На таких термометрах должна быть указана нормальная глубина погружения и температура $t_в$ выступающей части термометра при его градуировке. Если температура выступающей части $t'_в$ при пользовании термометром значительно отличается от температуры $t_в$ при его градуировке, то для приведения показаний термометра к температуре выступающей части $t_в$ необходимо к показаниям термометра алгебраически прибавить поправку

$$\Delta t_1 = m\beta\,(t_в - t'_в), \qquad (3\text{-}1\text{-}3)$$

где m — число градусов, отсчитываемое по термометру при нормальной глубине его погружения; β — коэффициент видимого расширения жидкости в термометрическом стекле (табл. 3-1-1). Учет этой поправки особенно необходим для термометров с органическим наполнением. При пользовании техническими термометрами, длина нижней части которых превышает 700—800 мм, необходимо иметь в виду, что показания их верны только при полном погружении нижней части в среду с одинаковой температурой.

3-2. Термометры манометрические

Общие сведения и устройство термометров. Действие манометрических термометров основано на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего (термометрического) вещества в замкнутой герметичной термосистеме. Манометрические термометры являются техническими приборами и в зависимости от рабочего вещества термосистемы они подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные). В зависимости от рабочего вещества термосистемы их применяют для измерения температуры жидких и газообразных сред от —150 до 600°C. Термометры со специальным заполнителем предназначены для измерения температуры от 100 до 1000°C (ГОСТ 8624-71).

Манометрические термометры изготовляют показывающие и самопишущие. Самопишущие термометры выпускаются с дисковой

и ленточной диаграммной бумагой. Привод диаграммной бумаги осуществляется синхронным двигателем, а в некоторых модификациях термометров часовым механизмом. Манометрические термометры выпускаются с односторонней, двусторонней и безнулевой шкалой.

Термометры манометрические изготовляются с дополнительным устройством для сигнализации (или регулирования) температуры. Некоторые типы термометров снабжаются передающим преобразователем с выходным унифицированным сигналом постоянного тока 0—5 мА или пневматическим передающим преобразователем с выходным унифицированным пневматическим сигналом 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа).

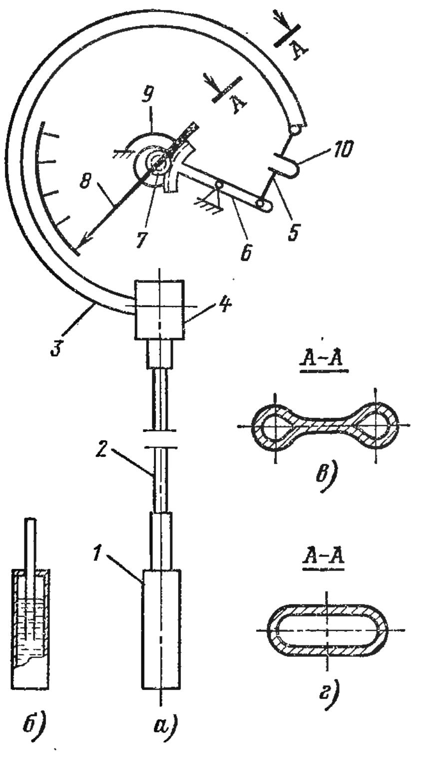


Рис. 3-2-1. Схема устройства показывающего манометрического термометра.

Показывающие и самопишущие манометрические термометры могут быть использованы для измерения температур во взрывоопасных помещениях. В этом случае привод диаграммной бумаги осуществляется часовым механизмом. Если в этих условиях необходимо иметь термометр с дистанционной передачей показаний на вторичный прибор, то она должна быть пневматической.

Схема устройства показывающего манометрического термометра представлена на рис. 3-2-1. Термосистема термометра (рис. 3-2-1, *а*) состоит из термобаллона *1*, погружаемого в среду, температура которой измеряется, капилляра *2* и манометрической пружины *3*. Один конец пружины впаян в держатель *4*, канал которого соединяет внутреннюю полость манометрической пружины через капилляр с термобаллоном. Второй свободный конец пружины герметизирован и шарнирно с помощью поводка *5* связан с сектором *6*. Этот сектор в свою очередь соединен зубчатым зацеплением с трибкой *7*, на оси которой насажена указательная стрелка *8*. Для выбора зазора в передаточном механизме установлен спиральный волосок *9*, конец внутреннего витка которого закреплен на оси трибки.

Термосистема термометра заполнена рабочим веществом, например газом (или жидкостью), под некоторым начальным давлением. При нагревании термобаллона увеличивается давление газа

в замкнутой герметизированной термосистеме, в результате чего пружина деформируется (раскручивается) и ее свободный конец перемещается. Движение свободного конца пружины передаточным механизмом (поводком, сектором и трибкой) преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы прибора. По положению указателя на шкале термометра производят отсчет температуры.

Следует отметить, что в отличие от газовых и жидкостных термометров у конденсационных (парожидкостных) термометров термобаллон (рис. 3-2-1, *б*) частично заполнен конденсатом (примерно на 0,7—0,75 объема), а в верхней части термобаллона над конденсатом находится насыщенный пар этой жидкости. Кроме того, капилляр у этих термометров вставлен на некоторую глубину внутрь термобаллона. Манометрическая пружина и капилляр термометра заполнены тем же конденсатом, что и термобаллон. Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара в термобаллоне. При этом зависимость между давлением насыщенного пара и температурой является вполне определенной, однозначной и известной для конденсата, которым заполнена термосистема термометра. При нагревании термобаллона термометра часть конденсата в его паровом объеме с зеркала испаряется, изменяя давление насыщения до значения, соответствующего температуре конденсата в термобаллоне. Это в свою очередь вызывает повышение давления в термосистеме термометра, под действием которого пружина раскручивается и ее свободный конец с помощью передаточного механизма перемещает стрелку.

В выпускаемых казанским заводом «Теплоконтроль» показывающих манометрических термометрах используется манометрическая пружина с новым профилем сечения (рис. 3-2-1, *в*). Отличительной особенностью этого профиля по сравнению с ранее применяемыми овальными, плоскоовальными и др. (рис. 3-2-1, *г*) является наличие среднего пережатого участка, на котором зазор между стенками отсутствует. По боковой кромке сечения расположены два канала каплевидной формы, которые повышают механическую прочность пружины.

Следует отметить, что внутренний объем пружин со средним пережатым участком и колебания размера его минимальны, что уменьшает температурную погрешность термометра и обеспечивает стабильность ее значений. Изменяя большую ось сечения этой пружины получают оптимальное соотношение между начальным внутренним объемом ее и приращением этого объема при раскручивании пружины на рабочий угол.

Дальнейшее снижение температурной погрешности газовых и жидкостных термометров, обусловленной отклонением температуры пружины от нормальной (20°С), достигается введением термобиметаллического компенсатора *10* в поводок передаточного механизма (рис. 3-2-1, *а*). Капилляр термометров изготовляют из латуни или стали наружным диаметром 2,5 и внутренним 0,35 мм. Длина капилляра термометра бывает различной, но она находится

обычно в пределах следующего ряда: 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40 и 60 м. Капилляр, идущий от корпуса прибора к термобаллону, помещают в защитную металлическую оболочку, предохраняющую его от повреждений. Для изготовления термобаллона и его хвостовика в настоящее время применяют сталь марки 1Х18Н9Т. Применение этой стали дало возможность изготовлять термобаллоны термометров на условное давление до 64 кгс/см² (6,4 МПа) без защитной гильзы и лишь на условное давление среды, температура которой измеряется, от 64 до 250 кгс/см² (6,4—25 МПа) — с защитной гильзой.

Выпускаются электроконтактные показывающие мано-

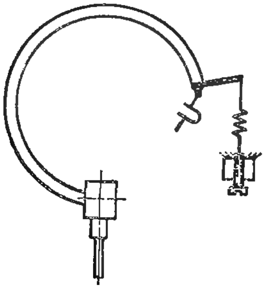


Рис. 3-2-2. Схема устройства корректора начальной отметки шкалы манометрического термометра.

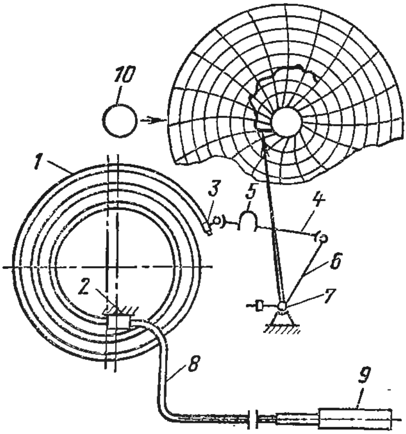


Рис. 3-2-3. Схема устройства самопишущего манометрического термометра.

метрические термометры, выполняемые по схеме рис. 3-2-1, *а* и используемые для сигнализации о достижении предельных значений температур.

Манометрические термометры с безнулевой шкалой снабжаются корректором для регулировки начальной отметки шкалы прибора. Схема корректора термометра, состоящего из винтовой пружины и регулировочного винта, показана на рис. 3-2-2.

Схема устройства самопишущего манометрического термометра показана на рис. 3-2-3. Спиральная манометрическая пружина *1* с пережатым профилем сечения (рис. 3-2-1, *в*), впаянная одним концом в держатель *2*, вторым свободным концом с помощью скобы *3* шарнирно соединена с поводком *4*, снабженным термобиметаллическим компенсатором *5*. Второй конец поводка шарнирно соединен с рычагом *6*, связанным с осью *7* рычага пера. К каналу держателя, соединяющему внутреннюю полость спиральной пружины, припаян капилляр *8*, который вторым своим концом герметично соединен через хвостовик с термобаллоном *9*, погружаемым в среду, температура которой измеряется.

Привод диаграммного устройства осуществляется с помощью синхронного двигателя *10* или часового механизма. Дисковая диа-

грамма в серийно выпускаемых приборах рассчитана на один оборот в сутки.

Самопишущий термометр с двумя термосистемами дает возможность одновременно производить запись на диаграммной бумаге температуры двух сред. Самопишущие термометры такого типа, снабженные приспособлением для увлажнения одного из термобаллонов, могут быть использованы в качестве психрометров для одновременного измерения температуры и влажности газовой среды.

При применении манометрических конденсационных и жидкостных термометров необходимо иметь в виду, что изменение высоты положения термобаллона относительно манометрической пружины может вызвать изменение показаний термометра.

Термометры газовые. Манометрические газовые термометры позволяют измерять температуру от —150 до +600°С. В качестве рабочего вещества в газовых термометрах используется азот. Перед заполнением всей термосистемы термометра азотом термосистема и газ должны быть хорошо просушены. Длина соединительного капилляра этих термометров 0,6—60 м.

При постоянном объеме газа зависимость его давления от температуры определяется выражением

$$p_t = p_0 (1 + \beta t), \tag{3-2-1}$$

где p_0 — давление газа при температуре 0°С; β — термический коэффициент давления газа, K^{-1} [для идеального газа $\beta = 1/T_0 = 0{,}003661\ K^{-1}$, а для азота $\beta = (0{,}003661—0{,}000013p_0)\ K^{-1}$].

При изменении температуры газа в термобаллоне термометра от $t_н$ до $t_к$ будет изменяться и давление газа в соответствии с выражением

$$p_к = \frac{p_н (1 + \beta t_к)}{1 + \beta t_н}, \tag{3-2-2}$$

где $p_н$ и $p_к$ — давление газа при температуре, соответствующей началу $t_н$ и концу $t_к$ шкалы термометра.

Вычитая и прибавляя к правой части уравнения (3-2-2) значение $p_н \beta t_н$, после несложных преобразований получаем:

$$\Delta p = p_к - p_н = \frac{p_н \beta (t_к - t_н)}{1 + \beta t_н}. \tag{3-2-3}$$

Из этого выражения видно, что размер рабочего давления Δp в термосистеме газового термометра прямо пропорционален значению начального давления $p_н$ и диапазону измерения $(t_к — t_н)$ прибора. Следует отметить, что при повышении температуры термобаллона термометра объем термосистемы его увеличивается в основном за счет расширения термобаллона и увеличения объема внутренней полости манометрической пружины. При увеличении температуры газа, а вместе с тем и давления его происходит частичное перетекание газа из термобаллона в капилляр и манометрическую пружину. При понижении температуры газа в термобаллоне будет

происходить обратный процесс. Вследствие этого при измерении температуры газовым термометром постоянство объема газа в термосистеме не сохраняется. Поэтому зависимость между давлением газа в термосистеме и его температурой незначительно отклоняется от линейной и действительное давление газа в термосистеме при температуре $t_к$ будет меньше подсчитанного по формуле (3-2-2). Однако эта нелинейность зависимости между p и t не играет существенной роли и шкала газового термометра получается практически равномерной.

Для увеличения рабочего давления Δp (3-2-3) термосистему газового термометра заполняют азотом под некоторым начальным давлением $p_н$ в зависимости от диапазона измерения температуры [с диапазоном измерения 0—100°C начальное давление $p_н \approx \approx 38$ кгс/см² (3,8 МПа), а с диапазоном измерения 0—600°C — $p_н \approx 15$ кгс/см² (1,5 МПа)]. Поэтому колебания атмосферного давления на показаниях газового термометра не сказываются.

Для уменьшения изменения показаний газового термометра, вызываемого отклонением температуры окружающего воздуха от 20°C, устанавливают термобиметаллический компенсатор в тягу передаточного механизма (рис. 3-2-1, *а* и 3-2-3), а также стремятся уменьшить отношение внутреннего объема пружины и капилляра к объему термобаллона. Это достигается увеличением объема, а следовательно, и размеров термобаллона. Например, при длине капилляра от 1,6 до 2,5 м длина корпуса термобаллона термометра выполняется равной 125 мм, а при длине капилляра до 40 м—500 мм. Диаметр термобаллона в том и другом случае равен 20 мм. Ввиду больших размеров термобаллона газовые термометры не везде могут быть применены.

Конденсационные термометры. Манометрические конденсационные термометры выпускаются с пределами измерения от —50 до 300°C. В качестве конденсата используется фреон-22 (CHF_2Cl) от —25 до 80°C, пропилен (C_3H_6) — от —50 до 60°C, хлористый метил (CH_3Cl) — от 0 до 125°C, ацетон (C_3H_6O) — от 100 до 200°C, этилбензол (C_8H_{10}) — от 160 до 300C° и т. п. Следует отметить, что однозначная зависимость давления насыщенного пара от температуры имеет место только до определенной температуры, называемой критической. Вследствие этого верхний предел шкалы манометрического конденсационного термометра должен быть всегда ниже критической температуры $t_{кр}$ данного рабочего конденсата. В этом случае рабочее давление в термосистеме термометра также не будет превышать критического давления $p_{кр}$ для выбранного конденсата.

Начальное давление в термосистеме конденсационного термометра для данного рабочего конденсата определяется температурой начальной отметки шкалы и равно давлению насыщенного пара при этой температуре. Например, при использовании хлористого метила (температура кипения — 24°C, $t_{кр} = 143,8$°C, $p_{кр} = = 65,8$ кгс/см²) в качестве рабочего конденсата для термометра

с диапазоном измерения 0—120°С начальное давление равно примерно 2,6 кгс/см² (0,26 МПа), а прирост давления при 120° С равен 43,7 кгс/см² (4,37 МПа). При диапазоне измерения 20—120°С начальное давление равно примерно 4,9 кгс/см² (0,49 МПа), а прирост давления при температуре 120°С равен 41,5 кгс/см² (4,15 МПа). Термобаллон конденсационных термометров имеет небольшие по сравнению с газовыми термометрами размеры (длина 78, диаметр 16 мм). Длина соединительного капилляря от 0,6 до 25 м.

Характерной особенностью конденсационных термометров является значительная неравномерность шкалы. Для линеаризации статической характеристики и, следовательно, получения равномерной шкалы некоторые типы манометрических конденсационных термометров (например ТПП2-1) снабжаются специальным дополнительным устройством (рис. 3-2-4). Упоры *1* дополнительного устройства *2* подводятся к манометрической пружине *3* с внешней стороны так, что при ее раскручивании пружина последовательно ложится на них, начиная с упора, расположенного рядом с ее закрепленным концом. При этом постепенно все большая часть длины пружины исключается из работы, а вместе с тем вводится нелинейность, которая противоположна нелинейности изменения давления насыщенного пара в термосистеме от температуры. Это и обеспечивает получение равномерной шкалы конденсационного термометра.

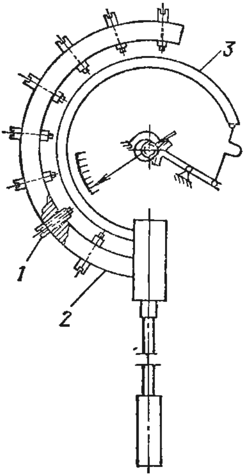


Рис. 3-2-4. Схема устройства конденсационного манометрического термометра с устройством для получения равномерной шкалы.

Другой характерной особенностью конденсационных термометров является то, что рабочее давление в термосистеме для данного конденсата зависит только от диапазона измерения и изменения давления насыщенного пара этого конденсата от температуры. Другие же параметры термометра не оказывают влияния на рабочие давления в его термосистеме. Поэтому изменение показаний термометра, вызываемое отклонением температуры окружающего воздуха от 20°С, обусловливается главным образом изменением модуля упругости материала применяемой манометрической пружины и значением допускаемого непостоянства показаний прибора.

Показания конденсационных термометров зависят от высоты расположения термобаллона (выше или ниже) по отношению к корпусу прибора, а также и от изменения атмосферного давления.

Зависимость показаний конденсационного термометра от высоты расположения термобаллона по отношению к корпусу прибора имеет место в том случае, когда по условиям измерений в манометрической пружине и капилляре рабочее вещество находится

в жидкой фазе. Это имеет место в тех случаях, когда температура среды, в которую погружен термобаллон, выше температуры воздуха, окружающего корпус прибора и капилляр. Если в этом случае термобаллон будет расположен выше корпуса прибора, то показания термометра будут завышены, а если ниже — занижены. При этом погрешность показаний термометра в начале шкалы будет больше, чем в конце шкалы, так как в последнем случае давление столба рабочей жидкости в капилляре будет весьма малой долей общего давления в термосистеме. Например, для термометра с диапазоном измерения 0—120°С, термосистема которого заполнена хлористым метилом, при расположении термобаллона выше корпуса прибора на 10 м погрешность при 40°С равна +3,9°С, а при 110°С — +1,3°С. Атмосферное давление в случае его изменения нагружает или разгружает манометрическую пружину термометра, вызывая скручивание или распрямление ее, что и обусловливает изменение показаний термометра. Если увеличение или уменьшение атмосферного давления будет иметь малое значение по сравнению с давлением в термосистеме, то с влиянием его можно не считаться. Например, при измерении температуры от 60 до 120°С термометром, заполненным хлористым метилом, с погрешностью за счет изменения атмосферного давления на ± 5% нормального можно не считаться, так как эта погрешность при 60°С составляет около 0,1°С, а при 110°С около 0,04° С.

Термометры жидкостные. Для заполнения термосистемы жидкостных манометрических термометров применяют пропиловый алкоголь, метансилол, силиконовые жидкости и т. п. Для жидкостных термометров длина соединительного капилляра 0,6—10 м.

Термометры жидкостные позволяют измерять температуру от —150 до +300°С. Они выпускаются с различными диапазонами измерения температуры в указанном интервале. Шкала жидкостных термометров получается практически равномерной.

Термометры жидкостные существенно отличаются от газовых и конденсационных, так как жидкости, применяемые в качестве заполнителей, практически несжимаемы. В термометрах этого типа объем термобаллона для данной рабочей жидкости должен быть согласован с диапазоном измерения прибора, с изменением объема внутренней полости манометрической пружины при рабочем ходе свободного конца ее [см. (10-2-8)], а вместе с тем и с изменением давления в термосистеме [см. (10-2-7)].

При нагреве термобаллона от $t_н$ до $t_к$ жидкость расширяется, а термобаллон увеличивает свой объем. Вследствие этого при нагреве термобаллона из него будет вытесняться рабочая жидкость объемом

$$\Delta V = V(\beta - 3\alpha)(t_к - t_н), \tag{3-2-4}$$

где V — внутренний объем термобаллона, м^3; β — объемный коэффициент расширения жидкости, К$^{-1}$; α — коэффициент линейного расширения материала термобаллона, К$^{-1}$.

Вытесненный из термобаллона объем жидкости ΔV вследствие охлаждения от $t_к$ до температуры окружающего воздуха $t_в$ уменьшится до значения $\Delta V_в$. При этом настолько же увеличит манометрическая пружина объем своей внутренней полости $\Delta V_п$. В этом случае имеем:

$$\Delta V_п = \Delta V_в = \frac{V(\beta - 3\alpha)(t_к - t_н)}{1 + \beta(t_к - t_в)}. \quad (3\text{-}2\text{-}5)$$

Решая это уравнение относительно V, получаем:

$$V = \frac{\Delta V_п [1 + \beta(t_к - t_в)]}{(\beta - 3\alpha)(t_к - t_н)}. \quad (3\text{-}2\text{-}6)$$

Из выражения (3-2-6) видно, что чем больше диапазон измерения жидкостного термометра, тем меньше должен быть внутренний объем термобаллона при одинаковых прочих условиях. Например, для жидкостных термометров с диапазоном измерения 40—80°С длина корпуса термобаллона $L_{д.т} = 110$ мм, а с диапазоном измерения 60—310°С $L_{д.т} = 18$ мм. Диаметр термобаллона в том и другом случае $d_т = 12$ мм.

В жидкостных термометрах рабочее давление в термосистеме в отличие от конденсационных и газовых не связано строгой зависимостью с $t_н$, $t_к$ и начальным давлением. Для жидкостных термометров определяющее значение имеет $\Delta V_п$, так как в манометрических пружинах различной жесткости необходимое значение $\Delta V_п$ может быть получено при различных давлениях (см. гл. 10). Чем больше жесткость пружины, тем больше должно быть рабочее давление для получения необходимого значения $\Delta V_п$. Изменение атмосферного давления на показания жидкостных термометров практически не влияет.

Для уменьшения дополнительной температурной погрешности жидкостных термометров применяют манометрические пружины с новым профилем сечения (рис. 3-2-1, *в*) и термобиметаллический компенсатор (рис. 3-2-1, *а* и 3-2-3).

Основные метрологические характеристики манометрических термометров. Манометрические термометры рассчитаны на работу при температуре окружающего воздуха от 5 до 50°С и относительной влажности до 80%. Согласно ГОСТ 8624-71 термометры изготовляют следующих классов точности: 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Класс точности конденсационных термометров устанавливается для последних двух третей температурной шкалы; на первой трети шкалы класс точности должен быть не ниже последующего класса точности.

Изменение показаний манометрических термометров, вызываемое влиянием температуры окружающего воздуха при отклонении ее от 20°С, до любого значения в интервале от 5 до 50°С не должно превышать значения, вычисленного по формуле

$$\delta_t = \pm (x + \alpha_т \Delta t), \quad (3\text{-}2\text{-}7)$$

где δ_t — изменение показаний термометра, выраженное в % диапазона измерения; x — значение допускаемого непостоянства показаний термометра, равное половине предела допускаемой основной погрешности, %; $\alpha_т$ — температурный коэффициент термометра в % на °С (для газовых 0,05; для конденсационных 0,04; для жидкостных 0,075 и для приборов со специальным заполнителем 0,035); Δt — абсолютное значение отклонения температуры окружающего воздуха от 20°С.

3-3. Дилатометрические и биметаллические термометры

Дилатометрические и биметаллические термометры основаны на использовании свойства твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Если температурный интервал невелик, то зависимость длины твердого тела от температуры может быть выражена линейным уравнением

$$l_t = l_0 (1 + \alpha t), \tag{3-3-1}$$

где l_t — длина твердого тела при температуре t, м; l_0 — длина того же тела при температуре 0°C, м; α — средний коэффициент линейного расширения твердого тела от 0°C до t, °C^{-1}.

Значения средних коэффициентов линейного расширения для некоторых материалов приведены в табл. 3-3-1.

Таблица 3-3-1

Средние коэффициенты линейного расширения материалов

Материал	$\alpha \cdot 10^6$, °C^{-1}	Интервал температур, °C
Латунь	18,3—23,6	0—400
Медь красная	15,3	0—150
Хромомолибден	12,3	0—100
Сталь никелевая (20—22% Ni)	20,0	0—500
Инвар	0,9	0—200
Плавленый кварц	0,55	—

Дилатометрические термометры. Термометры этого типа, несмотря на ряд достоинств (простота устройства, высокая чувствительность) для измерения температуры используются сравнительно редко. Они находят применение главным образом в качестве первичных измерительных преобразователей в системах автоматического регулирования температуры.

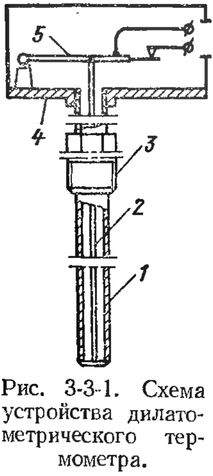


Рис. 3-3-1. Схема устройства дилатометрического термометра.

На рис. 3-3-1 представлена схема устройства дилатометрического термометра. Он состоит из металлической трубы (чувствительного элемента) *1*, внутри которой находится стержень *2*. Труба имеет коэффициент линейного расширения больше, чем стержень. Верхний конец трубы закреплен в штуцере *3*. В головке *4* находится электроконтактное устройство, состоящее из рычага *5*, сочлененного со стержнем и контактами (на схеме показан один контакт), нормально замкнутой контактной группы. Нижняя часть термометра полностью погружается в среду, температура которой измеряется. При повышении температуры среды труба удлиняется больше, чем стержень, вследствие чего стержень перемещается вниз. При перемещении

стержня одновременно приводится в движение рычаг, который при заданной температуре размыкает контакты, а вместе с тем и электрическую цепь регулирующего устройства. Изменение длины трубы, а вместе с тем и перемещение стержня при повышении температуры среды от $t_н$ до $t_к$ равно:

$$\Delta l = l_к - l_н = \frac{l_н (\alpha_т - \alpha_с)(t_к - t_с)}{1 + (\alpha_т - \alpha_с) t_н}, \quad (3\text{-}3\text{-}2)$$

где $l_н$, $l_к$ — длина трубы при температуре $t_н$ и $t_к$, м; $\alpha_т$, $\alpha_с$ — коэффициенты линейного расширения трубы и стержня, $К^{-1}$.

Из уравнения (3-3-2) видно, что размер рабочего хода стержня Δl термометра прямо пропорционален значению начальной длины трубы $l_н$ и диапазону изменения температуры.

Из уравнения (3-3-2) чувствительность дилатометрического термометра

$$S = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_н (\alpha_т - \alpha_с)}{1 + (\alpha_т - \alpha_с) t_н}. \quad (3\text{-}3\text{-}3)$$

Для получения необходимой чувствительности дилатометрического термометра трубу обычно изготовляют из материала с большим коэффициентом линейного расширения (например, латуни марки Л62 или стали марки Х17Н13М2Т и ХН60В), а стержень из материала, коэффициент линейного расширения которого близок к нулю, например из инвара (см. табл. 3-3-1).

Рассмотренная схема первичного преобразователя (рис. 3-3-1) реализуется в дилатометрических электрических двухпозиционных терморегулирующих устройствах типа ТУДЭ, которые изготовляет казанский завод «Теплоконтроль» на различные диапазоны температур в интервале от —30 до +1000°С. Они выпускаются классов точности 1,5 и 2,5 в зависимости от диапазона температур и модификации.

Рассмотрим реле температуры типа РТ-300, которое представляет собой дилатометрическое устройство с электроконтактной системой. Это реле может быть использовано для сигнализации (или регулирования) температуры в диапазоне от 100 до 300°С в качестве первичного преобразователя.

Схема устройства реле температуры РТ-300 показана на рис. 3-3-2. Чувствительным элементом реле является трубка *1* и пружина контактного устройства *2*. Материал трубки по сравнению с материалом пружины имеет больший коэффициент линейного расширения. При нагревании чувствительного элемента реле трубка удлиняется и связанный с ней упор *3* перемещается относительно пружины, что приводит к уменьшению зазора Δl, устанавливаемого в зависимости от заданного значения температуры с помощью регулировочного винта *4*.

При достижении заданного значения температуры среды зазор Δl полностью выбирается, а дальнейшее повышение температуры ее вызывает растяжение пружины и, следовательно, размыкание контактов *5*. Понижение температуры среды вызывает уменьшение длины трубки и возврат пружины в исходное положение. При этом контакты снова замыкаются.

Узел задатчика температур снабжен шкалой, что облегчает регулировку зазора Δl. Погрешность срабатывания контактов не превышает ±5°С. Реле РТ-300 выпускает казанский завод «Теплоконтроль».

Биметаллические температурные реле. В качестве чувствительного элемента в биметаллических температурных реле исполь-

зуется термобиметаллическая пластина *1* (рис. 3-3-3). Эта пластина состоит из двух слоев разнородных металлов, обладающих различными коэффициентами линейного расширения (например, инвар — латунь, инвар — сталь), сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения. Различие коэффициентов линейного расширения металлических пластин, составляющих термобиметалл, и положено в основу принципа действия биметаллических температурных реле. При нагревании термобиметаллической пластины последняя изгибается в сторону металла (инвара) с меньшим коэффициентом линейного расширения и при заданной температуре замыкает контакты *2*. Регулировка зазора между контактами на заданное значение температуры осуществляется винтом *3* в однородной металлической пластине. Эта пластина так же как и термобиметаллическая крепится к изолятору *4*. Для защиты пластин от действия среды, температура которой контролируется, они помещены в гильзу *5*.

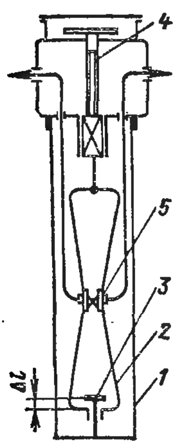


Рис. 3-3-2. Схема устройства реле температуры РТ-300.

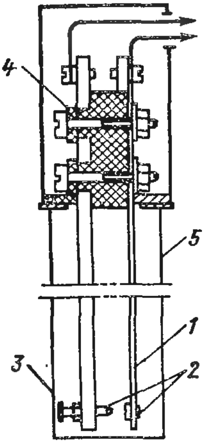


Рис. 3-3-3. Схема устройства биметаллического реле температуры.

Область применения биметаллических температурных реле лежит в интервале от —60 до 300°С в зависимости от марки используемого биметалла. Термобиметалл, кроме того, находит широкое применение для целей температурной компенсации в различных измерительных приборах.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

4-1. Общие сведения

Термоэлектрический метод измерения температур основан на строгой зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-э. д. с.) термоэлектрического термометра от температуры.

Термоэлектрические термометры широко применяются для измерения температур до 2500°С в различных областях техники и в научных исследованиях. Они могут использоваться для измерения температуры от —200°С, но в области низких температур термоэлектрические термометры получили меньшее распространение, чем

термометры сопротивления, рассматриваемые в гл. 5. В области высоких температур (выше 1300—1600°C) термоэлектрические термометры находят применение главным образом для кратковременных измерений; для длительного же измерения высоких температур они применяются только в отдельных особых случаях.

Следует иметь в виду, что с ростом температуры возрастает влияние агрессивных свойств среды и продолжительность работы термоэлектрических термометров быстро снижается. Созданию надежных высокотемпературных термоэлектрических термометров для длительного применения уделяется в настоящее время большое внимание как у нас, так и за границей.

К числу достоинств термоэлектрических термометров следует отнести достаточно высокую степень точности, возможность централизации контроля температуры путем присоединения нескольких термоэлектрических термометров через переключатель к одному измерительному прибору, возможность автоматической записи измеряемой температуры с помощью самопишущего прибора, возможность раздельной градуировки измерительного прибора и термоэлектрического термометра.

4-2. Основы теории термоэлектрических термометров

В основу измерения температур с помощью термоэлектрических термометров положены термоэлектрические явления, открытые Зеебеком в 1821 г. Применение этих явлений к измерению температур основано на существовании определенной зависимости между термо-э. д. с., устанавливающейся в цепи, составленной из разнородных проводников, и температурами мест их соединения. Если взять цепь (рис. 4-2-1), составленную из двух различных термоэлектрически однородных по длине проводников *A* и *B* (например, меди и платины), то при подогреве спая *1* в цепи появляется электрический ток, который в более нагретом спае *1* направлен от платины *B* к меди *A*, а в холодном спае *2* — от меди к платине. При подогреве спая *2* ток получает обратное направление. Такие токи называются термоэлектрическими. Электродвижущая сила, обусловленная неодинаковыми температурами мест соединения *1* и *2*, называются термоэлектродвижущей силой, а создающий ее преобразователь — термоэлектрическим первичным преобразователем или термометром (употреблявшееся название — термопара).

Для объяснения механизма возникновения термо-э. д. с. воспользуемся электронной теорией, которая основывается на представлении о наличии в металлах свободных электронов. В различных металлах плотность свободных электронов (число электронов в

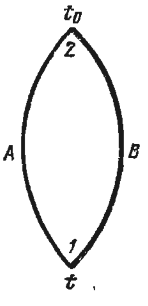


Рис. 4-2-1. Термоэлектрическая цепь из двух различных однородных проводников ($t > t_0$).

единице объема) неодинакова. Вследствие этого в местах соприкосновения двух разнородных металлов, например, в спае *1* (рис. 4-2-1), электроны будут диффундировать из металла A в металл B с меньшей плотностью свободных электронов в большем количестве, чем обратно из металла B в металл A. Возникающее при этом в месте соединения электрическое поле будет препятствовать этой диффузии, и когда скорость диффузионного перехода электронов станет равна скорости их обратного перехода под влиянием установившегося определенного поля, наступит состояние подвижного равновесия. При таком состоянии между металлами A и B возникает некоторая контактная разность потенциалов. Так как плотность свободных электронов зависит также и от температуры места соединения металлов A и B, то в месте соприкосновения этих проводников при любых температурах возникает э. д. с.

$$e_{AB}(t) = f(t), \tag{4-2-1}$$

называемая контактной термо-э. д. с., значение и знак которой зависят от природы металлов A и B и температуры t места их соприкосновения.

В замкнутой цепи (рис. 4-2-1) из двух разнородных проводников A и B (например, меди и платины), когда $t > t_0$, появляется, как было сказано выше, термоток. Направление этого тока в спае *2* определяет знак как самого проводника, так и термо-э. д. с. Положительным называют тот термоэлектрод, от которого ток идет в спае, имеющем температуру $t_0 < t$, отрицательным — к которому ток идет в том же спае. Так как в рассматриваемой цепи ток направлен в спае *2* от A к B (от меди к платине), то термоэлектрод A — термоположительный, а B — термоотрицательный. Порядок написания термоэлектродов AB в индексе символа контактной термо-э. д. с. e_{AB} указывает на направление тока в спае *2* и поэтому термоэлектрод, написанный в индексе первым — положительный, а вторым — отрицательный.

При изменении температуры спаев *1* и *2* (рис. 4-2-1) ($t_0 > t$), направление термотока в спаях этой цепи изменяется, но знак термоэлектрода A при этом остается прежним, так как в спае *1* ток, как и раньше, направлен от A к B.

На основании закона Вольта в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников A и B, когда температуры мест их соединения одинаковы ($t_0 = t$) и отсутствуют посторонние э. д. с., термотока не возникает. Вследствие этого необходимо принять, что возникающие при этом контактные термо-э. д. с. в местах соединения *1* и *2* равны между собой, но различны по знаку, и поэтому суммарная термо-э. д. с. E цепи равна нулю:

$$E_{AB}(t, t) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t) = 0$$

или

$$E_{AB}(t, t) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t) = 0. \tag{4-2-2}$$

Для цепи из трех различных однородных проводников A, B и C (рис. 4-2-2), места соединений которых имеют одну и ту же температуру t, будем иметь:

$$e_{AB}(t)+e_{BC}(t)+e_{CA}(t)=0, \qquad (4\text{-}2\text{-}3)$$

т. е. сумма контактных термо-э. д. с. в замкнутой цепи из трех различных однородных проводников при одной и той же температуре мест их соединения равна нулю.

Из этого также следует, что

$$e_{AB}(t)=e_{AC}(t)+e_{CB}(t), \qquad (4\text{-}2\text{-}4)$$

т. е. если известна контактная термо-э. д. с. двух проводников по отношению к третьему, то этим самым определяется и контактная термо-э. д. с. между первыми двумя.

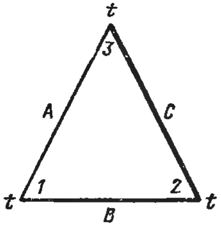


Рис. 4-2-2. Термоэлектрическая цепь из трех различных однородных проводников.

Закон Вольта можно распространить также и на замкнутую цепь, состоящую из любого числа различных однородных проводников A, B, C, ..., M, N. Тогда при одинаковой температуре t мест их соединения сумма контактных термо-э. д. с. равна нулю:

$$e_{AB}(t)+e_{BC}(t)+\ldots+e_{MN}(t)+e_{NA}(t)=0. \qquad (4\text{-}2\text{-}5)$$

Следует отметить, что этот закон является прямым следствием второго закона термодинамики, так как если бы сумма контактных термо-э. д. с. в подобной цепи не равнялась нулю, то в цепи был бы термоток. Если бы в цепи имелся термоток, то часть цепи стала бы нагреваться, а другая — охлаждаться, это означало бы, что отвод и подвод тепла осуществляется без затраты работы. Это противоречит второму закону термодинамики и приводит к выводу, что сумма контактных термо-э. д. с. в такой цепи равна нулю.

В замкнутом термоэлектрически однородном по всей длине проводнике независимо от размеров и формы его при неодинаковом нагреве его частей не возникает термотока. Однако из этого не следует, что в нем не возникает термо-э. д. с. На основании общего представления о возникновении этих сил вполне возможно допустить появление разности потенциалов в двух поперечных сечениях однородного проводника, когда температура этих сечений отличается на dt. Учитывая уравнение (4-2-1), имеем:

$$de=df(t);$$

отсюда для замкнутого однородного проводника, неодинаково нагретого, получаем:

$$e=\int de=\int_{t}^{t} df(t)=0, \qquad (4\text{-}2\text{-}6)$$

так как места замыкания имеют равную температуру t.

В незамкнутом однородном проводнике, если он неравномерно нагрет, на его концах может возникнуть разность потенциалов Δe:

$$\Delta e = \int de = \int_{t_1}^{t_2} df(t) = f(t_2) - f(t_1), \qquad (4\text{-}2\text{-}7)$$

которая зависит только от температур концов проводника и не зависит от распределения температуры по его длине.

Сказанное выше приводит к выводу, что термо-э. д. с., возникающая в термоэлектрической цепи (рис. 4-2-1), зависит лишь от температуры мест соединения *1* и *2* различных термоэлектрически однородных по всей длине проводников A и B и от их природы и не может зависеть от распределения температур в каждом ее отдельном термоэлектрически однородном проводнике. Однако получить на практике термоэлектрически однородные по всей длине проводники, особенно из сплавов неблагородных металлов, не легко. Необходимо также иметь в виду, что и химически однородный проводник становится источником паразитных термо-э. д. с., когда его части отличаются друг от друга физическим состоянием. Например, термо-э. д. с. термоэлектрического термометра может измениться, если термоэлектроды подвергаются действию магнитного поля или механическим воздействиям (сжатию, растяжению, кручению). Следует обратить внимание и на то, что металлы в отпущенном состоянии обычно имеют иное значение термо-э. д. с., чем в закаленном. Это особенно проявляется у сплавов. Местные загрязнения термоэлектрода также изменяют его термоэлектрические свойства. Если термоэлектрический термометр будет изготовлен из электродов с некоторой степенью термоэлектрической неоднородности, то при погружении в среду с неравномерным температурным полем образующиеся в нем паразитные термо-э. д. с. будут искажать его суммарную термо-э. д. с. тем больше, чем больше степень их неоднородности. Значение паразитной термо-э. д. с. зависит также и от степени неравномерности температурного поля среды.

На основании вышеизложенного мы можем написать основное уравнение термоэлектрического термометра, выражающее в общем виде зависимость суммарной термо-э. д. с., возникающей в цепи из двух разнородных термоэлектродов A и B, от температуры мест их соединения:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) \qquad (4\text{-}2\text{-}8)$$

или

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \qquad (4\text{-}2\text{-}9)$$

т. е. термо-э. д. с. термоэлектрического термометра (цепи из двух разнородных проводников), места соединений которых имеют разные температуры, равна разности контактных термо-э. д. с.

Принимая во внимание уравнение (4-2-1), представим уравнение (4-2-9) в следующем виде:

$$E_{AB}(t,\ t_0) = f(t) - f(t_0). \tag{4-2-10}$$

Вид функциональной зависимости $E_{AB}(t,\ t_0)$ от температур t и t_0 определяется видом функции $e = f(t)$. Однако при современном уровне наших знаний определить вид этой функции теоретически не представляется возможным, а потому его устанавливают опытным путем.

При измерении температуры термоэлектрическим термометром t_0 поддерживают постоянной, а t в этом случае является переменной температурой. Полагая в уравнении (4-2-10) $t_0 = \text{const}$ и вводя обозначение $f(t_0) = c$, приходим к зависимости

$$E_{AB}(t,\ t_0)\,|_{t_0 = \text{const}} = f(t) - c = F(t). \tag{4-2-11}$$

Если зависимость, выраженная уравнением (4-2-11), известна из кривой или таблицы, составленной на основании эксперимента, т. е. путем градуировки термоэлектрического термометра, например, методом сравнения с образцовым термометром, то измерение неизвестной температуры t сводится к измерению $E_{AB}(t,\ t_0)$. При этом предполагается, что температура t_0 остается неизменной, так как нарушение постоянства этой температуры влечет за собой изменение термо-э. д. с. термоэлектрического термометра. Обычно градуировку термоэлектрических первичных преобразователей или термометров производят при температуре $t_0 = 0$°С.

При пользовании градуировочными таблицами производится интерполирование (обычно линейное) между табличными значениями термо-э. д. с. Если табличные точки слишком редки, то линейная интерполяция приводит к большим погрешностям. В этом случае для целей интерполяции рекомендуется пользоваться специальными градуировочными таблицами (ГОСТ 3044-74) или графиками, а также эмпирическими формулами, которые для некоторых термоэлектрических термометров приведены ниже.

Из уравнения (4-2-11) непосредственно вытекает, что термо-э. д. с. $E_{AB}(t,\ t_0)$ термоэлектрического термометра можно рассматривать как непрерывную функцию от t, производная которой

$$\frac{dE_{AB}(t,\ t_0)}{dt} = S_t; \tag{4-2-12}$$

значение S_t зависит от температуры t и от природы термоэлектродов, образующих термоэлектрический термометр и характеризует его чувствительность.

При небольшой нелинейности зависимости $E_{AB}(t,\ t_0) = F(t)$ на отдельных ее участках можно считать эту зависимость линейной. Тогда $dE_{AB}(t,\ t_0)$ и dt в выражении (4-2-12) могут быть заменены конечными приращениями ΔE и Δt,

$$S_t = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \tag{4-2-12a}$$

Выясним, как влияет на значение термо-э. д. с. термоэлектрического термометра третий проводник, включенный в его цепь. Для этой цели рассмотрим термоэлектрический термометр, состоящий из термоэлектродов A и B, в цепь которого включен проводник C (рис. 4-2-3, *а*). При этом температура спая *1* равна t, а температура мест соединения (*2* и *3*) t_0. Определим термо-э. д. с. E для этой цепи. В соответствии с принятыми условиями

$$E = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0). \qquad (4\text{-}2\text{-}13)$$

Принимая во внимание уравнение (4-2-3), получаем из (4-2-13):

$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \qquad (4\text{-}2\text{-}14)$$

Это уравнение полностью совпадает с (4-2-9).

Рассмотрим теперь термоэлектрическую цепь, изображенную на рис. 4-2-3, *б*. Полагая, что температуры мест соединений *3* и *4* равны между собой, будем иметь:

$$E = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0). \qquad (4\text{-}2\text{-}15)$$

Полученное уравнение легко приводится к виду (4-2-9), если учесть, что $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$ и $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$.

Из этого следует, что термо-э. д. с. термоэлектрического термометра не изменяется от введения в его цепь третьего проводника, если температуры концов этого проводника одинаковы. Данное положение легко распространить на цепь, состоящую из любого числа проводников, т. е. включение одного, двух или более проводников в цепь термоэлектрического термометра не оказывает влияния на значение его термо-э. д. с., если концы этих проводников будут иметь одинаковую температуру.

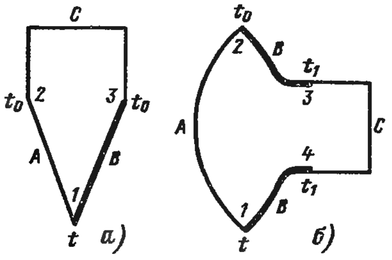


Рис. 4-2-3. Схема термоэлектрического термометра.

а — с включенным в его свободные концы проводником C; *б* — с включенным в термоэлектрод B проводником C.

Из сказанного выше также следует, что способ изготовления рабочего конца (сваркой, пайкой) на значение термо-э. д. с. термоэлектрического термометра не влияет, если только размеры спая таковы, что температура его во всех точках одинакова. Положение это верно также и для всех соединений термоэлектрической цепи. Нарушение же равенства температур концов третьего проводника, включенного в цепь термоэлектрического термометра, вызывает появление паразитной термо-э. д. с., которая будет зависеть от природы третьего проводника и от температуры мест его присоединения.

Предположим, что (рис. 4-2-3, *а*) температура спая *3* проводника C с проводником B не равна температуре t_0 спая *2* и имеет отличное от t_0 значение t'_0, причем $t'_0 > t_0$. В этом случае

термо-э. д. с. цепи будет равна:

$$E_1 = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0') + e_{CA}(t_0). \quad (4\text{-}2\text{-}16)$$

Вычитая из уравнения (4-2-9) уравнение (4-2-16), получаем:

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E_1 = e_{CB}(t_0') + e_{BA}(t_0) + e_{AC}(t_0); \quad (4\text{-}2\text{-}17)$$

воспользовавшись уравнением (4-2-3), выразим разность термо-э. д. с. в форме

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E_1 = e_{CB}(t_0') - e_{CB}(t_0) = E_{CB}(t_0',\ t_0). \quad (4\text{-}2\text{-}18)$$

В этом уравнении правая часть представляет собой термо-э. д. с. $E_{CB}(t_0',\ t_0)$, развиваемую термоэлектрической цепью *CB* с температурой спаев, равной температуре концов проводника *C*, т. е. t_0' и t_0.

Аналогично предыдущему предположим, что в схеме рис. 4-2-3, *б* температура места соединения *4* проводника *C* с проводником *B* не равна температуре t_1 места соединения *3* и имеет значение $t_1' > t_1$. В этом случае термо-э. д. с. цепи будет равна:

$$E_2 = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1') + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0). \quad (4\text{-}2\text{-}19)$$

Вычитая из уравнения (4-2-9) уравнение (4-2-19), получаем:

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E_2 = e_{CB}(t_1') - e_{CB}(t_1) = E_{CB}(t_1',\ t_1). \quad (4\text{-}2\text{-}20)$$

Из уравнений (4-2-18) и (4-2-20) видно, что при неравенстве температур спаев *2* и *3* (рис. 4-2-3, *а*) или мест соединений *3* и *4* (рис. 4-2-3, *б*) термо-э. д. с. термоэлектрического термометра изменяется соответственно на значение термо-э. д. с. $E_{CB}(t_0',\ t_0)$ и $E_{CB}(t_1',\ t_1)$ термоэлектрической цепи, составленной из проводника *C* в паре с термоэлектродом *B*.

Из сказанного следует, что нежелательно употреблять материалы для изготовления отдельных элементов термоэлектрического комплекта, значительно различающиеся термоэлектрически, даже там, где постоянство температур относительно обеспечено. Например, для изготовления добавочных или регулировочных резисторов следует избегать применения константана, дающего высокую термо-э. д. с. в паре с медью, и рекомендуется применять манганин.

4-3. Включение измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра

Для измерения термо-э. д. с. термоэлектрического термометра в его цепь необходимо включить измерительный прибор. Для этого необходимо либо разорвать термоэлектрическую цепь в спае *2* (рис. 4-2-1), либо разорвать один из термоэлектродов, например, *B*, и с помощью проводов *C* включить измерительный прибор (ИП) (рис. 4-3-1).

В первом случае (рис. 4-3-1, *а*) у термоэлектрического термометра будет три конца: рабочий *1*, погружаемый в среду, темпера-

тура которой измеряется, и свободные *2* и *3*, которые должны находиться при постоянной температуре (t_0 = const). Во втором случае (рис. 4-3-1, *б*), у термоэлектрического термометра окажется четыре конца: рабочий *1*, свободный *2* и нейтральные *3* и *4*. Концы

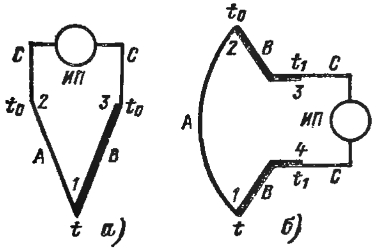


Рис. 4-3-1. Схемы включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра.

а — в свободные концы; *б* — в термоэлектрод.

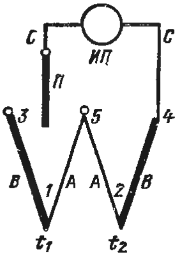


Рис. 4-3-2. Схема включения измерительного прибора в цепь дифференциального термоэлектрического термометра.

3 и *4* должны иметь одну и ту же температуру t_1, абсолютное значе́ние которой роли не играет.

Несмотря на отличие схем рис. 4-3-1, *а* и *б* термо-э. д. с., развиваемая термоэлектрическими термометрами, в обоих случаях будет одинакова, если будут одинаковы термоэлектроды *A* и *B*, а также температуры рабочих и свободных концов, так как термо-э. д. с. термометра, как было показано выше, не изменяется от введения в его цепь нового проводника, если температуры концов проводника одинаковы.

В ряде случаев бывает необходимо измерить разность температур. Подобные измерения осуществляются путем применения термоэлектрического термометра, состоящего также из двух термоэлектродов *A* и *B*, но у которого оба конца являются рабочими. Такой термоэлектрический термометр обычно называют дифференциальным. Схема включения измерительного прибора в цепь дифференциального термометра представлена на рис. 4-3-2. Рабочие концы дифференциального термоэлектрического термометра *1* и *2* погружают в среды, разность температур ($t_1 - t_2$) которых измеряют. При этом температура нейтральных концов *3* и *4* должна быть одинакова.

Следует также отметить, что, измеряя разность температур с помощью дифференциального термоэлектрического термометра, необходимо знать одну из температур, например t_2, так как термо-э. д. с. термометра в зависимости от температуры изменяется не по линейному закону. При измерении температуры t_2 места соединений *4* и *5* будут являться свободными концами, и они должны находиться при постоянной температуре (t_0 = const). Вследствие этого при измерении как разности температур $t_1 - t_2$, так и температуры t_2, свободные концы *3*, *4* и *5* должны находиться при по-

стоянной температуре t_0. Измерив разность термо-э. д. с. ΔE дифференциального термометра (переключатель *П* в положении *3*), а также термо-э. д. с. E_2, соответствующую температуре t_2 (переключатель *П* в положении *5*), определяют разность температур $\Delta t = t_1 - t_2$, пользуясь соответствующим участком градуировочной кривой или таблицы.

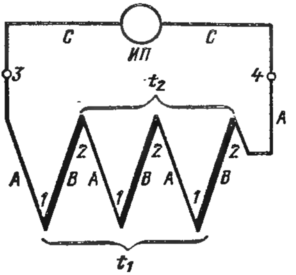


Рис. 4-3-3. Схема включения измерительного прибора в цепь дифференциальной термобатареи.

Для измерения малых разностей температур в целях получения большей термо-э. д. с. и повышения чувствительности применяют термобатарею, т. е. несколько последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей. Схема присоединения термобатареи к измерительному прибору для измерения разности температур ($t_1 - t_2$) двух сред показана на рис. 4-3-3. В данном случае, так же как и при измерении разности температур дифференциальным термоэлектрическим термометром, необходимо знать одну из температур, например t_2. Обычно ее измеряют с помощью вспомогательного термометра, который на схеме не показан. Измерив разность термо-э. д. с. ΔE термобатареи при равной температуре концов *3* и *4*, а также термо-э. д. с. E_2 вспомогательного термометра, определяют разность температур $\Delta t = t_1 - t_2$, пользуясь соответствующим участком градуировочной кривой или таблицы.

4-4. Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического термометра

При градуировке термоэлектрического термометра температура свободных концов обычно поддерживается при постоянной температуре t_0, равной 0°С. При измерении температуры в практических условиях температура свободных концов термометра, в большинстве случаев, поддерживается постоянной, но не равной 0°С. С изменением температуры свободных концов изменяется термо-э. д. с. термоэлектрического термометра, что и вызывает необходимость введения поправки.

Допустим, что при неизменной температуре t рабочего конца температура свободных концов, равная при градуировке t_0, изменилась в сторону увеличения и стала равной t'_0. В этом случае развиваемая термоэлектрическим термометром термо-э. д. с. $E_{AB}(t, t'_0)$ будет отличаться от градуировочного ее значения.

Пользуясь уравнением (4-2-9), определим разность

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E_{AB}(t,\ t'_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t) + e_{AB}(t'_0)$$

и после сокращения члена $e_{AB}(t)$ получим:

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E_{AB}(t,\ t'_0) = e_{AB}(t'_0) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t'_0,\ t_0).$$

После преобразования это уравнение принимает вид:

$$E_{AB}(t,\ t_0) = E_{AB}(t,\ t_0') + E_{AB}(t_0',\ t_0). \qquad (4\text{-}4\text{-}1)$$

Из уравнения (4-4-1), следует, что увеличение температуры свободных концов термоэлектрического термометра уменьшает его термо-э. д. с. на значение, равное термо-э. д. с. $E_{AB}(t_0',\ t_0)$ такого же термометра при температурах рабочего и свободных концов, равных соответственно t_0' и t_0.

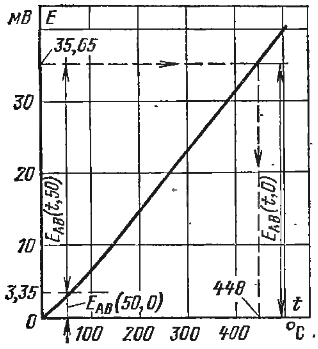


Рис. 4-4-1. Введение поправки на температуру свободных концов хромель-копелевого термоэлектрического термометра.

Если t_0' меньше t_0, то уравнение (4-4-1) принимает вид:

$$E_{AB}(t,\ t_0) = E_{AB}(t,\ t_0') - E_{AB}(t_0,\ t_0') \qquad (4\text{-}4\text{-}2)$$

и поправка $E_{AB}(t_0,\ t_0')$ имеет отрицательный знак.

Уравнения (4-4-1) и (4-4-2) применимы в тех случаях, когда термо-э. д. с. $E_{AB}(t,\ t_0')$ измеряют с помощью потенциометра (§ 4-14).

Если термо-э. д. с. измеряют с помощью милливольтметра (§ 4-13), значение $E_{AB}(t,\ t_0')$ рассчитывают по уравнению (4-13-3).

П р и м е р. При градуировке хромель-копелевого термоэлектрического термометра свободные концы имели температуру $t_0 = 0$°C, а при измерении их температура $t_0' = 50$° C. Показания потенциометра $E_{AB}(t,\ 50) = 32{,}3$ мВ, что соответствует температуре 409,5°C. Для пользования градуировочной кривой (рис. 4-4-1) необходимо вычислить значение термо-э. д. с. $E_{AB}(t,\ t_0)$ термометра при температуре свободных концов $t_0 = 0$°C и той же температуре t рабочего конца:

$$E_{AB}(t,\ 0) = E_{AB}(t,\ 50) + E_{AB}(50,\ 0).$$

Значение термо-э. д. с. $E_{AB}(50{,}0) = 3{,}35$ мВ определяется, например, по градуировочной кривой (рис. 4-4-1). Подставляя значения $E_{AB}(t,\ 50)$ и $E_{AB}(50,\ 0)$ в приведенное уравнение, получаем:

$$E_{AB}(t,\ 0) = 32{,}3 + 3{,}35 = 35{,}65 \text{ мВ}.$$

Термо-э. д. с. 35,65 мВ соответствует температура рабочего конца $t = 448$°C. Предположение линейной зависимости термо-э. д. с. от температуры привело бы к ошибочному результату: $t = 409{,}5 + 50 = 459{,}5$°C.

4-5. Определение термо-э. д. с. различных материалов при изучении их термоэлектрических свойств

Если известны термо-э. д. с. различных термоэлектродных материалов B, C, D, ... , N в паре с платиновым термоэлектродом A, то на основании закона Вольта можно определить термо-э. д. с. любой комбинации этих термоэлектродов между собой для опре-

деленных температур рабочего конца t и свободных концов $t_0 = 0°C$. Для изготовления термоэлектрода A при изучении термоэлектрических свойств различных материалов применяют проволоку из чистой платины марок Пл1 и Пл3 по ГОСТ 8588-64. Для платинового электрода должно быть известно значение термо-э. д. с. относительно группы нормальных платиновых термоэлектродов (ГНПТ) в интервале температур от 100 до 1200°C (ГОСТ 1790-63). Основанием к выбору платины служит то, что она может быть получена чистой, однородной по своему составу и, кроме того, может применяться в сравнительно большом температурном интервале.

Пусть известна термо-э. д. с. двух проводников B и C по отношению к платиновому термоэлектроду A при температуре t и t_0 соответственно рабочего и свободных концов:

$$E_{BA}(t,\ t_0) = e_{BA}(t) - e_{BA}(t_0);$$

$$E_{CA}(t,\ t_0) = e_{CA}(t) - e_{CA}(t_0).$$

Вычитая из первого уравнения второе и используя (4-2-3), получаем:

$$E_{BA}(t,\ t_0) - E_{CA}(t,\ t_0) = e_{BA}(t) - e_{CA}(t) - e_{BA}(t_0) + e_{CA}(t_0),$$

или

$$E_{BA}(t,\ t_0) - E_{CA}(t,\ t_0) = e_{BC}(t) - e_{BC}(t_0).$$

Правая часть этого уравнения определяет термо-э. д. с. $E_{BC}(t, t_0)$ термоэлектрического термометра с термоэлектродами B, C. Таким образом,

$$E_{BC}(t,\ t_0) = E_{BA}(t,\ t_0) - E_{CA}(t,\ t_0). \tag{4-5-1}$$

Из уравнения (4-5-1) видно, что термо-э. д. с. термоэлектрического термометра с электродами BC будет больше, чем $E_{BA}(t,\ t_0)$, если термо-э. д. с. электрода C в паре с платиной будет иметь отрицательный знак.

Положительный знак перед значением термо-э. д. с. $E_{BC}(t,\ t_0)$, вычисленный по уравнению (4-5-1), свидетельствует о том, что термоэлектрод B в паре с C является положительным термоэлектродом, а знак минус указывает, что термоэлектрод B является отрицательным.

Рассмотренный способ определения термо-э. д. с. различных материалов находит применение при комплектовании термометров из неблагородных термоэлектродных металлов.

П р и м е р. При температуре $t = 100°C$ и $t_0 = 0°C$ термоэлектроды хромель (Х) и алюмель (А) развивают в паре с платиной (П) термо-э. д. с.: $E_{ХП}(100,0) = +2,76$ мВ; $E_{АП}(100,\ 0) = -1,34$ мВ (ГОСТ 1790-63).

Определим, пользуясь уравнением (4-5-1), значение термо-э. д. с. хромель-алюмелевого термоэлектрического термометра:

$$E_{ХА}(100,\ 0) = E_{ХП}(100,\ 0) - E_{АП}(100,\ 0) = 2,76 + 1,34 = +\ 4,10 \text{ мВ}.$$

Знак плюс указывает на то, что хромель является положительным термоэлектродом, а алюмель отрицательным.

4-6. Основные требования, предъявляемые к термоэлектродным материалам

К термоэлектродным материалам, предназначенным для изготовления термоэлектрических термометров, предъявляют ряд требований: жаростойкость и механическая прочность; химическая инертность; термоэлектрическая однородность; стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики; однозначная, желательно близкая к линейной, зависимость термо-э. д. с. от температуры; высокая чувствительность.

Жаростойкость и механическая прочность в значительной степени определяют верхние температурные границы применимости термоэлектродных материалов, а вместе с тем и термоэлектрических термометров. С ростом температуры резко ускоряются все процессы, ведущие к разрушению термоэлектродов нагреваемой части термометра: падение механической прочности; химическое взаимодействие термоэлектродов со средой, с соприкасающимися телами и друг с другом; рекристаллизация, возгонка и т. п.

Устанавливая пригодность того или иного материала для изготовления термоэлектродов, особенно высокотемпературных термоэлектрических термометров, следует уделять большое внимание вопросу возможных химических и других взаимодействий его с материалом, работающим с ним в паре, с окружающей средой и соприкасающимися керамическими деталями арматуры. Например, термоэлектрические термометры платиновой группы хорошо работают в нейтральных или окислительных средах и быстро гибнут в восстановительной среде и в вакууме (в вакууме при температуре выше 500°С платина возгоняется). Термоэлектрические термометры же на основе вольфрама, молибдена, рения и их сплавов надежно работают в вакууме, в нейтральной или восстановительной (водородной) среде, но сравнительно быстро выходят из строя в окислительной среде. Стабильность термо-э. д. с. монокристаллов вольфрама, молибдена и рения значительно выше, чем у соответствующих поликристаллических металлов [52].

При наличии участков термоэлектродов со значительной термоэлектрической неоднородностью при больших градиентах температуры развивается паразитная термо-э. д. с., могущая искажать показания температуры на 10—25°С и более.

Стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики материалов обуславливают точность измерения температуры, а вместе с тем и возможность применения этих материалов для изготовления взаимозаменяемых термоэлектрических термометров. Основными причинами нестабильности термоэлектрических характеристик высокотемпературных термоэлектрических термометров с металлическими электродами являются рекристаллизация, преимущественное испарение одного из компонентов сплава, внутрикристаллические изменения, взаимодействие с окружающей средой, а также поведение примесей.

Ввиду того что термо-э. д. с., развиваемая большинством термоэлектрических термометров с металлическими электродами, обычно невелика (0,01—0,07 мВ/°С), то естественно, что при прочих равных условиях термометр, имеющий более высокую термо-э. д. с., предпочтительнее. Это дает возможность использовать менее чувствительный, а вместе с тем и более надежный измерительный прибор.

При выборе термоэлектродных материалов необходимо учитывать также и технологию их изготовления, так как она определяет возможность получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов. Кроме того, при выборе термоэлектродных материалов необходимо стремиться к тому, чтобы их стоимость была невысокой.

Надежная работа термоэлектрических термометров в промышленных условиях определяется не только качеством и свойствами термоэлектродного материала, но также качеством и конструкцией арматуры термометра, которая при неудачном выполнении и выборе защитных материалов может свести на нет высокие качества самих термоэлектродов.

4-7. Общие сведения о термоэлектрических термометрах

По характеру термоэлектродных материалов термоэлектрические термометры подразделяют на две группы: термоэлектрические термометры с металлическими термоэлектродами из благородных и неблагородных металлов; термоэлектрические термометры с термоэлектродами из тугоплавких соединений или их комбинаций с графитом и другими материалами.

Термоэлектрические термометры первой группы являются наиболее распространенными, они широко вошли в практику технологического контроля и научно-исследовательских работ.

Термоэлектрические термометры второй группы в настоящее время являются больше объектами опытно-исследовательских работ, чем средством технологического контроля температур. Внедрению этих высокотемпературных термоэлектрических термометров в широкую практику препятствуют трудность обеспечения стабильности их термо-э. д. с. во времени и недостаточная взаимозаменяемость. В то же время термоэлектрические термометры этой группы представляют большой практический интерес.

Термоэлектрические термометры с термоэлектродами из благородных металлов, главным образом платиновой группы, широко применяют для измерения температур в области от 300 до 1800°С. Ниже рассмотрим наиболее распространенные термоэлектрические термометры платиновой группы.

Платинородий-платиновые термоэлектрические термометры применяются для измерения температур в области 300—1600°С в окислительной и нейтральной среде. Для измерения отрицательных температур платинородий-платиновые термоэлектрические термометры

не применяются, так как их термо-э. д. с. в этой области меняется немонотонно. Платинородий-платиновые термометры находятся в числе лучших термоэлектрических термометров по точности и воспроизводимости термо-э. д. с. Положительным термоэлектродом у этих термометров является платинородий (сплав 90% Pt и 10% Rh), отрицательным — чистая платина. Термоэлектроды платинородий-платиновых термоэлектрических термометров изготовляют обычно из проволоки диаметром 0,5 мм. Такой диаметр термоэлектродов общепринят для термометров платиновой группы, так как он удовлетворяет условиям достаточной прочности, и стоимость таких термометров не слишком велика.

Применяемые платинородий-платиновые термоэлектрические термометры в зависимости от их назначения разделяются на следующие три основные разновидности: эталонные (ТПП-Э), образцовые (ТПП-О) и рабочие повышенной точности (ТПП-РПТ) и технические (ТПП). Основные технические характеристики термоэлектрических термометров ТПП-Э, ТПП-О и ТПП-РПТ приведены в табл. 4-7-1, а ТПП — в табл. 4-7-2 и 4-7-3. Удельное электрическое сопротивление термоэлектродной проволоки для термометрических термометров приведено в табл. 4-7-4.

Таблица 4-7-1

Эталонные, образцовые и рабочие повышенной точности термоэлектрические термометры

Обозначения типов термоэлектрических термометров	Назначение термоэлектрических термометров	Диапазон измерений, °С	Нормируемые погрешности, °С
ТПП-Э	Рабочие эталоны	630,74—1064,43	$\sigma = 0{,}1$
ТПП-О1	Образцовые 1-го разряда	300—1100	$\varepsilon = 0{,}2 \div 0{,}4$
ТПП-О2	Образцовые 2-го разряда	300—1200	$\varepsilon = 0{,}4 \div 1$
ТПП-О3	Образцовые 3-го разряда	300—1200	$\varepsilon = 0{,}8 \div 2{,}0$
ТПР-О2	Образцовые 2-го разряда	600—1800	$\varepsilon = 0{,}5 \div 4{,}0$
ТПР-О3	Образцовые 3-го разряда	600—1800	$\varepsilon = 1 \div 7{,}0$
ТПП-РПТ	Рабочие повышенной точности	300—1200	$\Delta = 0{,}2 \div 1{,}5$
ТПР-РПТ	Рабочие повышенной точности	600—1800	$\Delta = 0{,}4 \div 8{,}0$

Примечания: 1. Согласно ГОСТ 8.083-73 σ — среднее квадратическое отклонение результата измерений; ε — доверительная погрешность, равная 2σ; Δ — абсолютная допускаемая погрешность.

2. Для ТПР-О2, ТПР-О3 и ТПР-РПТ материалы термоэлектродов: платинородий (30% родия) — платинородий (6% родия). Для остальных типов: платинородий (10% родия) — платина.

Эталонные платинородий-платиновые термоэлектрические термометры служат для воспроизведения Международной практической температурной шкалы от 630,74 до 1064,43°С. Для этой области температуру рассчитывают по уравнению

$$E(t,\ t_0) = a + bt + ct^2, \tag{4-7-1}$$

где $E(t,\ t_0)$ — термо-э. д. с. эталонного платинородий-платинового термоэлектрического термометра, свободные концы которого находятся при температуре $t_0 = 0$°С, а рабочий конец — при температуре t; a, b, c — константы, вычисляемые по значениям $E(t,\ t_0)$ при температуре $630{,}74 \pm 0{,}2$°С (точка затвердевания

Таблица 4-7-2

Стандартные рабочие термоэлектрические термометры с металлическими термоэлектродами

Обозначения типов термоэлектрических термометров	Наименование материалов термоэлектродов	Обозначения градуировки	Диапазон измерений при длительном применении, °С	Допускаемый предел измерений при кратковременном применении, °С
ТПП	Платинородий (10% родия)—платина	ПП	0—1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия)—платинородий (6% родия)	ПР30/6	300—1600	1800
ТВР	Вальфрамрений (5% рения)—вольфрамрений (20% рения)	ВР5/20	0—2200	2500
ТХА	Хромель-алюмель	ХА	—200—1000	1300
ТХК	Хромель-копель	ХК	—200—600	800

Примечания: 1. Под длительным применением термоэлектрического термометра понимается работа его в течение нескольких сотен часов, при этом изменения первоначальной градуировки не должны превышать 1%.

2. Под кратковременным применением термоэлектрического термометра понимается работа его в течение нескольких десятков часов, при этом изменения первоначальной градуировки не должны превышать 1%.

Таблица 4-7-3

Пределы допустимых основных погрешностей термоэлектрических термометров при температуре свободных концов 0°С (ГОСТ 3044-74)

Обозначение типов термоэлектрических термометров	Обозначение градуировки	Интервал температур, °С	Пределы допустимых основных погрешностей, мВ
ТПП	ПП	0—300	$\Delta E_т = 0{,}01$
ТПП	ПП	Свыше 300—1600	$\Delta E_т = 0{,}01 + 2{,}5 \cdot 10^{-5} (t - 300)$
ТПР	ПР30/6	Свыше 300—1800	$\Delta E_т = 0{,}01 + 3{,}3 \cdot 10^{-5} (t - 300)$
ТВР	ВР5/20	0—1000	$\Delta E_т = 0{,}080$
		Свыше 1000—1800	$\Delta E_т = 0{,}08 + 4{,}0 \cdot 10^{-5} (t - 1000)$
ТХА	ХА	—50—300	$\Delta E_т = 0{,}16$
		Свыше 300—1300	$\Delta E_т = 0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4} (t - 300)$
ТХК	ХК	—50—300	$\Delta E_т = 0{,}200$
		Свыше 300—800	$\Delta E_т = 0{,}2 + 6{,}0 \cdot 10^{-4} (t - 300)$

Примечание. t — температура рабочего конца термоэлектрического термометра.

сурьмы), измеряемой эталонным платиновым термометром сопротивления (гл. 5), и в точках затвердевания серебра (961,93°С) и золота (1064,43°С).

Таблица 4-7-4

Удельное электрическое сопротивление термоэлектродной проволоки при температуре 20° С для термоэлектрических термометров и проводов

Марка или наименование сплава	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м	Марка или наименование сплава	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м	Марка или наименование сплава	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м
ПлТ	0,11	Хромель Т	0,68	Константан	0,465
ПР-6	0,18	Алюмель	0,33	Медь	0,017
ПР-10	0,20	Копель	0,47	ТП	0,025
ПР-30	0,19	Хромель К	0,67	(99,4% Cu + + 0,6% Ni)	

Платиновый электрод эталонного термоэлектрического термометра изготовляется из платиновой проволоки, чистота которой должна быть такой, чтобы относительное сопротивление $W = R_{100}/R_0$ было не менее 1,3920. Здесь R_0 и R_{100} — сопротивления образца платиновой проволоки, измеряемые соответственно при 0 и 100°С. Более подробные сведения о требованиях, предъявляемых к эталонным платинородий-платиновым термоэлектрическим термометрам, приведены в ГОСТ 8.157-75.

Платиновые электроды образцовых платинородий-платиновых термоэлектрических термометров 1-го (ТПП-О1) и 2-го (ТПП-О2) разрядов изготовляют из платины марки Пл-1 с относительным сопротивлением $R_{100}/R_0 \geqslant 1,392$, а термометров 3-го (ТПП-О3) разряда — из платины марки Пл-3 с относительным сопротивлением $R_{100}/R_0 \geqslant 1,3915$ (ГОСТ 8588-64).

Платинородий-платиновые термоэлектрические термометры рабочие повышенной точности (ТПП-РПТ), применяемые для точных измерений, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к образцовым термоэлектрическим термометрам (ТПП-О), и поверяться одним из методов, рекомендуемых ГОСТ 8.083-73.

Рабочие платинородий-платиновые термоэлектрические термометры ТПП (табл. 4-7-2) применяют в промышленности для измерения температуры газовых сред в тех случаях, когда термоэлектрические термометры с электродами из неблагородных металлов не удовлетворяют необходимым требованиям. Платинородий-платиновые термоэлектрические термометры ТПП (градуировка ПП) при применении их в промышленности позволяют производить более точное измерение температуры, чем термометры с электродами из неблагородных металлов (табл. 4-7-3). Для электродов термоэлектрических термометров ТПП применяют платинородий марки ПР-10 и платину марки ПлТ с относительным сопротивлением $R_{100}/R_0 \geqslant 1,3910$ (ГОСТ 10821-75). Градуировочная характеристика термоэлектрических термометров ТПП приведена в табл. П4-7-1.

Для измерения температур газовых сред до 900—1000°С в энергетике и промышленности термоэлектрические термометры ТПП применять экономически нецелесообразно, так как в этой области температур описываемые ниже термоэлектрические термометры

с электродами из неблагородных металлов вполне обеспечивают надлежащие точность и надежность измерения.

Термоэлектрические термометры ТПП, электроды которых находятся в механически ненапряженном состоянии, могут применяться в указанном выше диапазоне температур в окислительной (воздушной) и нейтральной средах. При измерении температур в промышленности создать такие условия не всегда представляется возможным. В большинстве случаев в печных газах имеются составные части, содержащие серу, которые при высоких температурах могут вызвать загрязнение электродов и порчу термометра. К загрязнению и порче рабочего конца термоэлектрического термометра ТПП приводит также соприкосновение электродов с углеродом и его соединениями. Загрязнение электродов термометра кремнием даже в небольших количествах делает платиновый электрод хрупким. Источником загрязнения электродов кремнием часто бывают керамические детали арматуры термометра. Устранить опасность загрязнения электродов термоэлектрического термометра кремнием можно лишь применением защитной керамики из окиси алюминия. Восстановительные газы при высоких температурах гибельно действуют на платину, вызывая значительное изменение термо-э. д. с. термометра.

На изменение термо-э. д. с. термоэлектрического термометра действует большинство загрязнений металлами, однако не все из них делают платиновый электрод хрупким. В качестве примера можно привести медь, которая, загрязняя электроды и вызывая большое изменение термо-э. д. с. термометра, не оказывает заметного влияния на эластичность электродов.

Следует отметить, что даже «газонепроницаемые» защитные гильзы арматуры термоэлектрического термометра при высоких температурах не могут длительное время препятствовать проникновению газов, паров металлов или летучих соединений металлов.

По результатам спектрального анализа платинового электрода термоэлектрических термометров ТПП, длительно находящихся при высоких температурах ($t > 1200$°C) в воздушной среде, многими исследователями было обнаружено наличие родия. При этом присутствие родия в платиновом электроде термометров тем больше, чем выше температура, при которой находились они. Перенос родия из одного электрода в другой обусловлен испарением его с поверхности платинородиевого электрода термометра и поглощением паров родия при высоких температурах платиновым электродом. Перенос родия из платинородиевого в платиновый термоэлектрод приводит к уменьшению термо-э. д. с. термоэлектрического термометра ТПП.

По опытным данным платинородиевый электрод термоэлектрических термометров ТПП значительно более устойчив к воздействию высоких температур и загрязнений, чем платиновый электрод. Поэтому вполне естественно, что у нас и за границей за последние годы большое внимание уделялось изучению характеристик и ста-

бильности термо-э. д. с. термометров с электродами из сплавов платины и родия.

В США наряду с термометрами ТПП применяются также платинородий-платиновые термоэлектрические термометры, у которых платинородиевый электрод состоит из 87% Pt и 13% Rh.

Платинородий-платинородиевые термоэлектрические термометры. За последние годы получили распространение для измерения высоких температур термоэлектрические термометры с электродами из платинородиевых сплавов (PtRh 30/6, PtRh 40/10, PtRh 20/5, PtRh 30/13 и др.) [1]. Зависимость термо-э. д. с. этих термометров от температуры приведена на рис. 4-7-1.

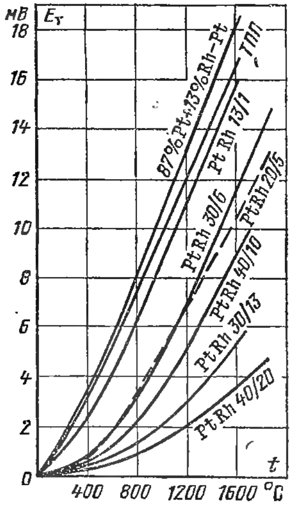


Рис. 4-7-1. Градуировочные характеристики некоторых термоэлектрических термометров платинородиевой группы.

Наибольшее распространение из числа платинородий-платинородиевых термоэлектрических термометров получил термоэлектрический термометр ТПР с электродами PtRh 30/6 (марка проволок ПР-30 и ПР-6 по ГОСТ 10821-75). Эти термометры в зависимости от их назначения разделяются на образцовые 2-го (ТПР-О2) и 3-го (ТПР-О3) разрядов (табл. 4-7-1), рабочие повышенной точности ТПР-РПТ (табл. 4-7-1) и рабочие ТПР (табл. 4-7-2 и 4-7-3).

Термоэлектрический термометр ТПР (ПР 30/6) может применяться в окислительной (воздушной) среде и нейтральной атмосфере для измерения температур до 1800°С. При технических измерениях температур термоэлектрическими термометрами ТПР нет необходимости термостатировать свободные концы их, а вместе с тем и вводить поправку, если их температура не превышает 50—100°С. В этом случае при измерении температур в интервале от 1100 до 1800°С и температуре свободных концов t_0' 50, 70 и 100°С методическая погрешность не превышает соответственно 1,3—1, 2,7—2 и 5,3—4,1°С. Термоэлектрический термометр ТПР (ПР 30/6) развивает термо-э. д. с. при $t = 50$°С и $t_0 = 0$°С, равную 0,012 мВ, при $t = 70$°С и $t_0 = 0$°С, равную 0,025 мВ, а при $t = 100$°С и $t_0 = 0$°С, равную 0,051 мВ. Градуированная характеристика термоэлектрических термометров ТПР приведена в табл. П4-7-2.

Широкое использование в промышленности термоэлектрических термометров с электродами платиновой группы в какой-то степени ограничено их высокой стоимостью. Поэтому создание высокотемпе-

[1] Числитель дроби означает содержание родия в процентах по отношению к платине в положительном электроде термоэлектрического термометра, знаменатель — в отрицательном электроде.

ратурных термоэлектрических термометров с электродами из менее дефицитных материалов, обеспечивающих достаточную надежность и точность измерения температур различных сред и жидкой стали, является актуальной задачей.

Термоэлектрические термометры с электродами из неблагородных металлов широко применяются для измерения температур жидкостей, газов, пара, поверхностей нагрева и в ряде других случаев. Некоторые из них применяют также для кратковременных измерений температуры расплавленных металлов. Термоэлектрические термометры с электродами из неблагородных металлов сравнительно дешевы и в большинстве случаев развивают большую термо-э. д. с., чем термометры платиновой группы.

Получение стандартной градуировочной характеристики термоэлектрических термометров с электродами из сплавов неблагородных металлов является достаточно трудной задачей, несмотря на то, что при изготовлении термоэлектродных проволок уделяется большое внимание их составу и термоэлектрической однородности по всей длине. Для обеспечения стандартной градуировки, например, термоэлектрических термометров из сплавов хромель Т, алюмель и копель (ГОСТ 492-73) применяют специальный способ комплектования термоэлектродов (ГОСТ 1790-63). Проволоку для электродов термоэлектрических термометров из сплавов хромель Т, алюмель и копель подвергают испытанию в паре с чистой платиной, производя измерение термо-э. д. с. проволоки в паре с платиной в интервале от 100 до 800 или до 1200°С в зависимости от сплава проволоки. Полученные в результате измерений данные позволяют разделить термоэлектродную проволоку из сплавов хромель Т, алюмель и копель по значению термо-э. д. с. при температуре свободных концов $t_0 = 0$°С на четыре класса. На рис. 4-7-2 представлены результаты измерений термо-э. д. с. в виде кривых B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3 и C_4, являющихся средними характеристиками соответственно положительных и отрицательных термоэлектродов из проволок B и C в паре с платиной, разделенных на классы 1, 2, 3 и 4.

При изготовлении термоэлектрических термометров из термоэлектродных проволок B и C подбирают их таким образом, чтобы положительный термоэлектрод B_1, относящийся к 1-му классу и имеющий наиболее низкую термо-э. д. с. в паре с платиной, комплектовался в паре с отрицательным термоэлектродом C_1, также отнесенным к 1-му классу, но имеющим наибольшую отрицательную термо-э. д. с. в паре с платиной. Аналогичным образом положительные термоэлектроды B_2, B_3 и B_4, относящиеся ко 2, 3 и 4-му классам, комплектуются с отрицательными термоэлектродами соответственно C_2, C_3 и C_4, т. е. 2, 3 и 4-го классов. Значения термо-э. д. с. при определенной температуре рабочего конца t и свободных концов $t_0 = 0$°С термоэлектрических термометров, комплектуемых с электродами B и C указанных четырех классов определяются по формуле (4-5-1).

При рассмотренном способе комплектования все термоэлектрические термометры с электродами *B* и *C* указанных классов будут иметь практически одинаковые термоэлектрические характеристики с небольшими отклонениями от некоторой средней характеристики *BC* (рис. 4-7-2). Этот способ комплектования термоэлектродов *B* и *C* используется при изготовлении хромель-копелевых и хромель-алюмелевых термоэлектрических термометров, которые выпускаются серийно со стандартной градуировочной характеристикой (ГОСТ 3044-74).

Хромель-копелевые термоэлектрические термометры типа ТХК широко применяются для измерения температур различных сред. Для изготовления положительного термоэлектрода используется хромель Т, представляющий собой жаропрочный немагнитный сплав на никелевой основе (89% Ni + 9,8% Cr + 10% Fe + 0,2% Mn). Отрицательный термоэлектрод — копель, сплав из меди и никеля (56% Cu + + 44% Ni). Верхний температурный предел длительного применения термоэлектродов из копелевой проволоки в зависимости от ее диаметра лежит в пределах 500—600°C при работе в атмосфере чистого воздуха (ГОСТ 1790-63). Невысокий температурный предел применения объясняется тем, что копелевая проволока, содержащая медь, сравнительно быстро окисляется при высоких температурах, и вследствие этого происходит изменение термо-э. д. с. термоэлектрода. Термоэлектрические термометры ТХК развивают наибольшую термо-э. д. с. по сравнению с другими типами термометров [при $t = -200°C$ и $t_0 = 0°C$, $E(t, t_0) = 9{,}60$ мВ; при $t = 100°C$ и $t_0 = 0°C$, $E(t, t_0) = 6{,}88$ мВ].

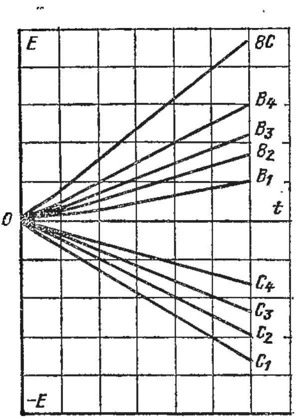


Рис. 4-7-2. Разделение термоэлектродной проволоки по значению термо-э. д. с. в паре с платиной на четыре класса.

Хромель-алюмелевые термоэлектрические термометры типа ТХА широко применяются для измерения температуры газовых сред, пара и жидкостей. Положительным термоэлектродом является хромелевая проволока, отрицательным служит алюмель, представляющий собой магнитный сплав на никелевой основе (94% Ni + + 2% Al + 2,5% Mn + 1% Si + 0,5% примеси). Термоэлектрические термометры ТХА обладают лучшей сопротивляемостью окислению, чем другие термометры из неблагородных металлов, при работе в воздушной среде. Опыт работы с термоэлектрическими термометрами показал, что алюмелевый электрод при температуре, близкой к 1000°C, менее устойчив к окислению, чем хромелевый. Верхние температурные пределы применения хромелевой и алюмелевой термоэлектродной проволоки устанавливаются в зависимости

от ее диаметра при работе в воздушной среде (ГОСТ 1790-63). При применении термоэлектродной проволоки, например, диаметром 3, 2 и 5 мм она может быть использована до 1000°С длительно и до 1200—1300°С кратковременно. При уменьшении диаметра термоэлектродной проволоки пределы ее применения должны быть снижены.

Для термоэлектрических термометров ТХК и ТХА, выпускаемых серийно Луцким приборостроительным заводом, верхние температурные пределы применения согласно ГОСТ 6616-74 приведены в табл. 4-7-2. Следует отметить, что рабочие верхние температурные пределы применения термоэлектрических термометров ТХК и ТХА устанавливаются в стандартах и технических условиях на конкретные типы термометров ТХК и ТХА. Допускаемые отклонения термо-э. д. с. термоэлектрических термометров этого типа при температуре свободных концов 0°С от значений, указанных в табл. П4-7-3 и П4-7-4, не должны превышать значений, приведенных в табл. 4-7-3 (ГОСТ 3044-74).

Термоэлектрические термометры с электродами из сплавов сильх и силин. Для термоэлектрических термометров с градуировкой ХА созданы новые сплавы сильх (Ni + 9% Cr + 0,9% Si) и силин (Ni + 2,4% Si) соответственно для положительного и отрицательного термоэлектродов [30]. Термоэлектродная проволока из этих сплавов обладает повышенной жаростойкостью. Воспроизводимость градуировки ХА термоэлектрических термометров с электродами из этих сплавов в диапазоне температур от 0 до 1200°С находится в допусках ГОСТ 3044-74, а в более жестких (примерно в два раза) допусках — в интервале температур от 200 до 1200°С. Опытная эксплуатация термоэлектрических термометров, изготовленных Луцким приборостроительным заводом, показала высокие качества термоэлектродной проволоки из сплавов сильх и силин.

Медь-константановые термоэлектрические термометры. Медь константановые термоэлектрические термометры ТМК приборостроительной промышленностью не изготовляются, но они находят применение в лабораторной практике, а иногда в промышленности для измерения температур от —200 до +350°С. Медь обладает большим постоянством термоэлектрических свойств, но имеет самый низкий верхний температурный предел при длительном применении. Это объясняется тем, что медь, а также сплавы, содержащие медь, сравнительно быстро окисляются в воздушной среде при более высокой температуре. При кратковременном применении в окислительной среде медь в паре с константаном или копелем может быть использована до 500°С. В вакууме медь-константановые термоэлектрические термометры допускают измерения до 700—800°С. Отрицательный термоэлектрод — константан представляет собой сплав (60% Cu + 40% Ni), близкий по своему составу к копелю.

Медь-константановый термоэлектрический термометр при температуре рабочего конца $t = 100$°С и свободных концов $t_0 = 0$°С развивает термо-э. д. с. около 4,1 мВ, а при $t = -200$°С и $t_0 = 0$°С термо-э. д. с. равна примерно —5,54 мВ.

Медь-константановые термоэлектрические термометры в интервале от —200 до 0°С применяются в качестве образцовых 2-го разряда для поверки рабочих средств измерений, предназначенных для измерения низких температур. Зависимость термо-э. д. с. этого термоэлектрического термометра от температуры

в указанном интервале выражается формулой

$$E(t, t_0) = at + bt^2 + ct^3, \qquad (4\text{-}7\text{-}2)$$

где a, b и c — постоянные коэффициенты, которые вычисляют, исходя из средних значений термо-э. д. с. термоэлектрического термометра при его градуировке.

Доверительная погрешность образцового медь-константанового термоэлектрического термометра, равная удвоенному значению среднего квадратического отклонения результата измерений, составляет 0,1—0,2°С.

Термоэлектрические термометры с электродами на основе вольфрама, рения, молибдена и их сплавов. Термоэлектрические термометры этой группы сначала были предложены главным образом для кратковременных измерений температуры расплавленных металлов. Стремление создать высокотемпературные термоэлектрические термометры из более дешевых и менее дефицитных тугоплавких металлов экономически целесообразно. Кроме того, создание высокотемпературных термоэлектрических термометров при современных требованиях промышленности является и необходимостью, так как контактный метод измерения температуры жидких металлов обеспечивает более высокую точность измерения, чем методы измерения температуры тел по их излучению (гл. 7). Термоэлектрические термометры с электродами из вольфрам-рениевого сплава находят широкое применение для длительного и кратковременного измерения температуры до 2000—2500°С в нейтральной или восстановительной газовой среде.

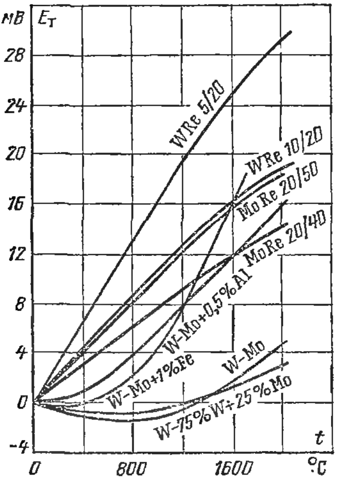


Рис. 4-7-3. Градуировочные характеристики некоторых термоэлектрических термометров на основе вольфрама, молибдена, рения и их сплавов.

На рис. 4-7-3 представлены градуировочные характеристики некоторых термоэлектрических термометров с электродами на основе вольфрама, молибдена, рения и их сплавов. Термоэлектрические термометры с электродами W—Mo, W — 75% W + 25% Mo и W—Mo + 1% Fe обладают общим недостатком: их градуировочные кривые имеют инверсию. Это дает основание считать, что эти термометры являются неперспективными. Термоэлектрические термометры ТП-6008 с электродами из вольфрама и молибдена, легированного алюминием (W—Mo + 0,5% Al), находят применение для измерения температуры чугуна и шлака.

Из числа термоэлектрических термометров с электродами из вольфрамрениевых сплавов, разработанных ВНИИАчермет и Московский завод электровакуумных приборов под руководством С. К. Данишевского, наибольшее распространение получили термометры ТВР с электродами WRe 5/20 (табл. 4-7-2). Положительным

термоэлектродом является вольфрам-рений 5% Re, отрицательным — вольфрам-рений 20% Re. Термоэлектрические термометры ТВР применяют для измерения температуры расплавленной стали. Они могут быть использованы для измерения температур в вакууме, в нейтральной или восстановительной среде.

Термоэлектрические термометры ТВР имеют три градуировочные характеристики (ГОСТ 3044-74). Допускаемые отклонения термо-э. д. с. термоэлектрических термометров ТВР при температуре свободных концов 0°С от значений, указанных в градуировочных таблицах (ГОСТ 3044-74), не должны превышать значений, приведенных в табл. 4-7-3.

Термоэлектрические термометры с электродами из сплавов молибдена с рением (MoRe 20/40, MoRe 20/50), градуировочная характеристика которых приведена на рис. 4-7-3, целесообразно применять для измерения температур в средах, содержащих углерод. Это обусловлено тем, что карбидизация молибдена в углеродосодержащей среде, по сравнению с вольфрамом, протекает менее активно, а рений карбидов не образует [49].

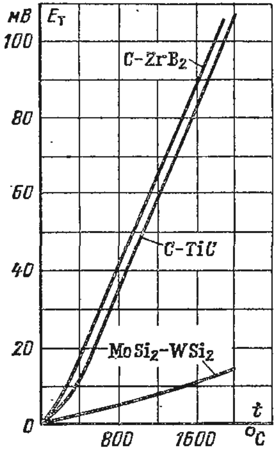


Рис. 4-7-4. Градуировочные характеристики термоэлектрических термометров MoSi—WSi, C—TiC и C—ZrB_2.

Представляют большой интерес работы НПО «Термоприбор» по созданию термоэлектрических термометров с электродами из монокристаллов вольфрама, молибдена и рения. Исследования показали, что монокристаллы вольфрама, молибдена и рения обладают высокой стабильностью термо-э. д. с.

Термоэлектрические термометры с электродами из тугоплавких соединений. Исследования термоэлектродных материалов из дисилицида молибдена ($MoSi_2$), дисилицида вольфрама (WSi_2), борида циркония (ZrB_2), карбида титана (TiC) и графита (С), проведенные под руководством Г. В. Самсонова, позволили создать три типа термоэлектрических термометров [52, 54]:

1) ТМСВ-340М с электродами $MoSi_2$—WSi_2 — для измерения температур до 1700°С газовых агрессивных сред, некоторых расплавленных солей, стекломасс и металлов;

2) ТГБЦ-350М с электродами С—ZrB_2 — для измерения температур до 1700—1800°С расплавов стали, чугуна, цветных и некоторых редких металлов, а также науглероживающих газовых сред до 2000°С;

3) ТГКТ-360М с электродами С—TiC — для измерения температур до 2500°С восстановительных, нейтральных, инертных газовых сред и в вакууме. На рис. 4-7-4 приведены градуировочные характеристики этих термоэлектрических термометров.

Для измерения высоких температур до 3000—3500°C авторы работы [52] рекомендуют в качестве перспективных термоэлектрические термометры с электродами ZrC—NbC и NbC—HfC. Имеются также возможности создания высокотемпературных термоэлектрических термометров с повышенной чувствительностью и стабильностью с термоэлектродами из керамики в комбинации с тугоплавким сплавом. Работы по созданию подобного типа термометров ведутся, например, в США.

Термоэлектрические термометры с электродами из волокнистого углерода могут применяться для измерения температур до 1300°C и выше в углеродосодержащих средах. Электроды этих термоэлектрических термометров, сделанные путем пиролиза вискозного кордного волокна, содержат 99,4% углерода (остальное — бор, водород и другие примеси). Для получения термоэлектродной пары образцы из волокнистого углерода подвергаются различной термообработке [52].

В настоящее время наиболее рациональными, а вместе с тем зарекомендовавшими себя при длительной эксплуатации в промышленности являются стандартные термоэлектрические термометры (табл. 4-7-2). Они являются взаимозаменяемыми и на них имеются стандартные градуировочные характеристики (ГОСТ 3044-74).

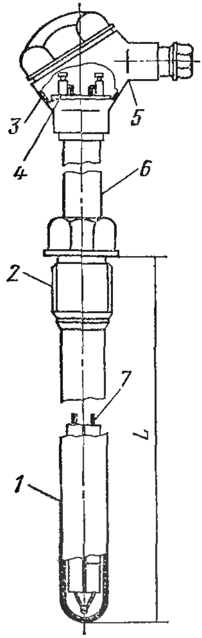


Рис. 4-8-1. Конструктивная схема термоэлектрического термометра.

4-8. Устройство термоэлектрических термометров

Общие сведения. Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, электроды термоэлектрического термометра, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру. У рабочих термоэлектрических термометров (рис. 4-8-1), применяемых для измерения температуры различных сред, арматура состоит из защитной гильзы *1*, неподвижного *2* или передвижного штуцера с сальниковым уплотнением (на рис. 4-8-1 не показан) и головки *3*, соединенной с неподвижным штуцером с помощью трубки *6* или непосредственно с гильзой при передвижном штуцере. В головке, снабженной крышкой и патрубком *5* с сальниковым уплотнением, помещена розетка *4* из изоляционного материала с зажимами для присоединения термоэлектродов *7* и проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором или преобразователем. Длина погружаемой (монтажной) части L в среду, температуру которой измеряют, выполняется различной для каждого конкретного типа термоэлектрического термометра.

Прежде чем рассматривать различные конструктивные формы термоэлектрических термометров, целесообразно установить некоторые общие требования, которым должна удовлетворять изоляция термоэлектродов, защитная арматура и конструкция термометров для обеспечения надежной их работы. Эти требования в основном сводятся к следующему:

1. Должно быть обеспечено изготовление надежного спая рабочего конца термоэлектрического термометра.

2. Необходимо обеспечить надежную электрическую изоляцию термоэлектродов термометра. При этом изоляция не должна загрязнять термоэлектроды в диапазоне измеряемых температур.

3. Защитная арматура, придающая термоэлектрическому термометру механическую стойкость, должна выбираться с учетом параметров среды, ее свойств и условий измерения температуры. Защитная гильза арматуры термометров в пределах измеряемых температур должна быть газонепроницаемой и нечувствительной к действию резких изменений температуры. Материал защитной гильзы не должен загрязнять термоэлектродов термометра в интервале измеряемых температур.

4. Конструкция арматуры термоэлектрического термометра должна быть такой, чтобы его электроды не находились в механически напряженном состоянии, так как при этих условиях они быстрее изменяют первоначальные термоэлектрические свойства.

5. Головка термоэлектрического термометра должна быть снабжена надежными уплотняющими устройствами, исключающими возможность попадания во внутреннюю ее полость и в гильзу влаги и пыли.

6. Конструкция термоэлектрических термометров для измерения средних и высоких температур различных сред должна обеспечивать возможность в условиях эксплуатации свободно извлекать электрически изолированные термоэлектроды из защитной гильзы для их периодической поверки, а в случае необходимости осуществлять и их замену.

7. Конструкция гильзы термоэлектрических термометров для измерения низких температур должна обеспечивать ее герметичность.

8. Конструкция термоэлектрических термометров лабораторных (повышенной точности) должна обеспечивать возможность термостатирования свободных концов.

9. Необходимо, чтобы материал защитной гильзы обладал хорошей теплопроводностью, конструкция термоэлектрического термометра была компактной, а теплочувствительная часть его имела как можно меньшие массу и воздушную прослойку между рабочей частью термоэлектродов и электрической изоляцией, а также защитной гильзой. Спай рабочего конца должен иметь хороший тепловой контакт с нижней частью защитной гильзы. Степень соблюдения этих условий определяет инерционность термоэлектрического термометра, характеризуемую показателем тепловой инерции ε_∞ (гл. 1).

Термоэлектрические термометры выпускаются со следующими значениями показателя тепловой инерции: до 5 с — малоинерционные; до 60 с — средней инерционности; до 180 с — большой инерционности. Для термоэлектрических термометров с значением показателя тепловой инерции более 180 с инерционность не нормируется (ГОСТ 6616-74).

Показатель тепловой инерции ε_∞ термоэлектрического термометра, определяемый согласно ГОСТ 6616-74 при определенном значении коэффициента теплоотдачи, характеризует инерционность термометра только при данных условиях теплообмена. Динамические свойства термоэлектрических термометров, необходимые в некоторых случаях для практики, следует характеризовать передаточной функцией.

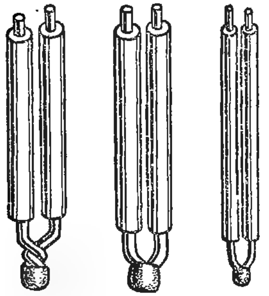


Рис. 4-8-2. Способы изготовления рабочего конца термоэлектрического термометра.

Термоэлектрические термометры выпускаются с различной степенью устойчивости к механическим воздействиям (обыкновенные и виброустойчивые) и могут изготовляться во взрывозащищенном исполнении (ГОСТ 6616-74).

Изготовление спая рабочего конца термоэлектрического термометра. Рабочий конец термоэлектрического термометра можно выполнять путем сварки, пайки или скрутки. Наибольшее распространение получил способ изготовления спая с помощью сварки, а пайку применяют только в специальных случаях. Скрутку рабочего конца часто применяют для термоэлектрических термометров вольфрамрениевой и вольфраммолибденовой групп.

Сварку электродов термоэлектрического термометра производят как с предварительной скруткой термоэлектродов, так и без скрутки (рис. 4-8-2). Не рекомендуется делать скрутку более двух оборотов. Если скрутка будет сделана с большим числом оборотов и с большим шагом, то спай рабочего конца может фактически находиться не в месте сварки, а на конце скрутки, в том месте, где термоэлектроды расходятся. Это может привести к значительным и не поддающимся учету погрешностям при измерении температуры. Поэтому лучше не прибегать к излишней скрутке термоэлектродов или не делать ее вообще.

Другим вариантом изготовления спая рабочего конца является приварка электродов к дну защитной гильзы. Это позволяет уменьшить инерционность термометра, но не обеспечивает возможности в условиях эксплуатации производить периодическую поверку термометра, а в случае необходимости замену термоэлектродов. Это является существенным недостатком конструкции, так как арматура термометра имеет значительно больший срок работы, чем его термоэлектроды.

Изоляционные материалы для армировки термоэлектрических термометров. Для электрической изоляции электродов термоэлектрических термометров, предназначенных для измерения температур до 1300°С, применяют одноканальные и двухканальные бусы или трубки из специального фарфора. Для термоэлектрических термометров, применяемых для измерения температур в области 1300—1900°С, используются бусы или трубки из окиси алюминия (AlO_3) и другие керамические изоляторы. При применении термоэлектрических термометров ТВР для измерения температуры жидкой стали часть электродов и рабочий конец термометра изолируют кварцевой трубкой.

Более подробные сведения о свойствах электроизоляционных материалов, применяемых для изоляции электродов термоэлектрических термометров, приводятся в специальной литературе.

Термоэлектрические термометры, предназначенные для измерения температуры среды, находящейся под давлением, близким к атмосферному, или под избыточным давлением, имеют различные конструктивные формы. Для термоэлектрических термометров ТПП, ТПР, ТХА и ТХК, выпускаемых серийно Луцким приборостроительным заводом, используется унифицированная конструкция защитной арматуры, разработанная НПО «Термоприбор». В качестве примера рассмотрим термоэлектрические термометры типа ТХА-0515 и ТХК-0515. Унифицированная конструкция защитной арматуры показана на рис. 4-8-3. Эта защитная арматура используется также и для термометров сопротивления (гл. 5), отличается в основном конструкцией защитных гильз, рассчитанных на различные условные давления $P_у$, и штуцеров. Головка же для всех модификаций термоэлектрических термометров ТХА-0515 и ТХК-0515 используется одна и та же. Головка к защитным гильзам *3—6* присоединяется к неподвижному штуцеру с помощью трубки, находящейся обычно вне среды, температура которой измеряется.

Защитные гильзы термометров ТХА-0515 и ТХК-0515, предназначенных для измерения температуры от —50 до +600°С, изготовляют из стали ОХ13 или Х18Н10Т. Защитные гильзы термометров ТХА-0515, предназначенных для измерения температуры от —50 до +900°С выполняют из стали ОХ20Н14С2. Штуцер передвижной изготовляют из стали 2Х13 или Х18Н9Т.

Электроды термоэлектрических термометров ТХА-0515 и ТХК-0515 изготовляют из проволоки диаметром 1,2 мм. Они по всей длине изолированы керамикой. Для обеспечения вибростойкости свободное пространство между изолированными электродами и внутренней стенкой гильзы заполнено сухим керамическим порошком, и гильза загерметизирована эпоксидным компаундом. Рабочий конец термометров изолирован от защитной гильзы керамическим наконечником. Термоэлектрические термометры с гильзой *6* (рис. 4-8-3) изготовляют также с неизолированным рабочим концом. Термометры ТХА-0515 и ТХК-0515 изготовляют с различной длиной погружаемой (монтажной) части L (от 120 до 2000 мм).

Герметизация гильз этих термоэлектрических термометров вызвана тем, что они рассчитаны на нижний предел измерения до —50°C, однако принятый способ герметизации исключает возможности извлечения термоэлектродов из гильзы для их поверки.

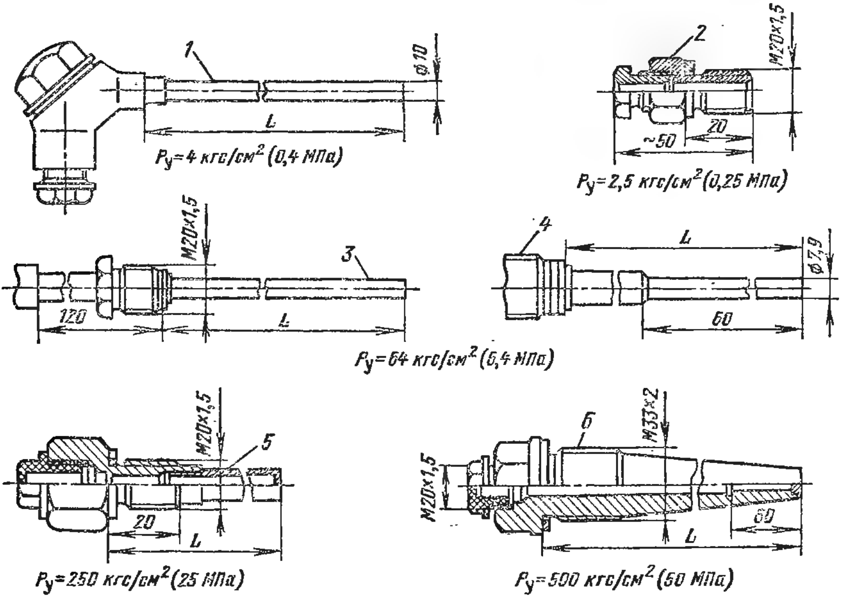


Рис. 4-8-3. Унифицированная конструкция защитной арматуры.

Термоэлектрические термометры ТХА-0515 и ТХК-0515 с гильзой *1* и передвижным штуцером *2* (рис. 4-8-3) предназначены для измерения температуры среды, находящейся под рабочим давлением, близким к атмосферному. Передвижной штуцер позволяет осуществлять не только крепление термометра на объекте, но и изменять глубину погружения.

Термометры ТХА-0515 и ТХК-0515 с гильзами *3* и *4*, снабженными неподвижным штуцером, могут быть использованы для измерения температуры различных сред, находящихся под давлением.

Термоэлектрические термометры ТХА-0515 и ТХК-0515 с гильзой *5*, снабженной неподвижным штуцером, предназначены для измерения температуры среды, находящейся под высоким рабочим избыточным давлением, например, для измерения температуры перегретого водяного пара до 560°C, находящегося под избыточным давлением до 140 кгс/см² (14 МПа) и при скорости протекания пара 40—45 м/с. Для этих термометров показатель тепловой инерции 120 с.

Термоэлектрические термометры ТХА-0515 с гильзой *6* используются в энергетике для измерения температуры перегретого водяного пара энергоблоков со сверхкритическими параметрами. Пока-

затель тепловой инерции этих термометров 60 с (с изолированным рабочим концом) и 40 с (с неизолированным).

Термоэлектрические термометры ТХА, предназначенные для измерения температуры газа до 900—1000°С, например в поворотной камере парогенератора, должны иметь термоэлектроды из проволоки диаметром 3,2 мм. Опыт эксплуатации показывает, что термоэлектрические термометры с такими электродами работают значительно больший срок, чем термометры из проволоки диаметром 1,2 мм. При измерении температуры в поворотной камере парогенератора инерционность термометра существенной роли не играет.

На рис. 4-8-4 показан хромель-алюмелевый термоэлектрический термометр ТХА-284. Этот тип термометров обладает высокой надежностью и широко применяется в энергетике для измерения температуры перегретого водяного пара до 560°С, находящегося под рабочим избыточным давлением до 140 кгс/см² (14 МПа) и при скорости протекания пара до 40—45 м/с. Защитная гильза термометра изготовлена из стали 1Х18Н9Т и рассчитана на условное давление до 250 кгс/см² (25 МПа). Термоэлектроды термометра, выполненные из проволоки диаметром 1,2 мм, изолированы двухканальной фарфоровой трубкой.

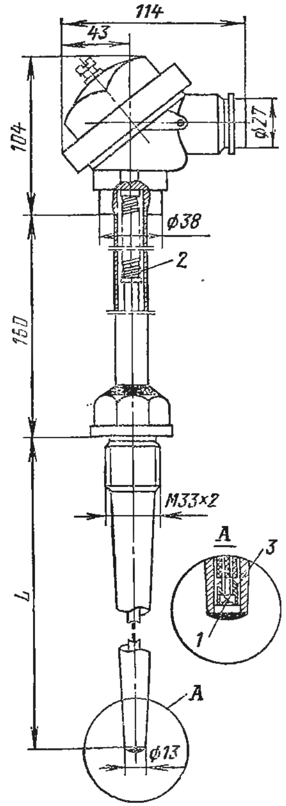


Рис. 4-8-4. Хромель-алюмелевый термоэлектрический термометр ТХА-284.

Как видно из рис. 4-8-4, к рабочему концу термометра приварена круглая металлическая пластина *1* диаметром около 5 мм и толщиной примерно 1,5 мм, что увеличивает площадь соприкосновения рабочего конца с дном защитного чехла. Хороший тепловой контакт металлической пластины, а следовательно, и рабочего конца термометра с дном защитного чехла обеспечивается с помощью спиральной пружины *2*, которая, воздействуя на фарфоровую трубку и фарфоровый колпачок *3*, прижимает пластину к дну защитной гильзы.

На основании исследований динамических свойств термоэлектрических термометров ТХА-284, выполненных на кафедре АСУ ТП МЭИ Н. П. Бувиным под руководством автора, передаточная функция термометров этого типа имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

Постоянные времени T_1 и T_2 и время установления показаний τ_1 и τ_5 (с недоходом в 1 и 5%) зависят от коэффициента теплоотдачи:

α, Вт/(м$^2 \cdot$ К)	600	1000	2000	3000
T_1, с	55	37	27	27
T_2, с	14	9	4	3
τ_1, с	270	180	130	130
τ_5, с	180	120	85	84

Хромель-алюмелевый термоэлектрический термометр типа ТХА-081, показанный на рис. 4-8-5, используется в энергетике для измерения температуры перегретого водяного пара до 560°С, находящегося под рабочим избыточным давлением до 250—300 кгс/см² (25—30 МПа) и при скорости протекания пара до 55 м/с.

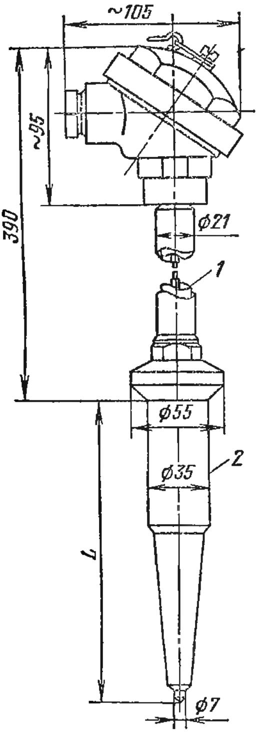


Рис. 4-8-5. Хромель-алюмелевый термоэлектрический термометр ТХА-081.

Показатель тепловой инерции термометра ТХА-081 не более 60 с. Термоэлектроды термометра, выполненные из проволоки диаметром 1,2 мм, изолированы двухканальными фарфоровыми изоляторами. Для уменьшения инерционности термометра, а вместе с тем и для обеспечения вибростойкости электроды его помещены в стальной чехол *1*. При этом рабочий конец термометра приварен к дну чехла, а свободное пространство между изоляторами и чехлом заполнено керамическим порошком.

Собранный стальной чехол с термоэлектродами и герметизированной огнеупорной замазкой вставлен в защитную гильзу *2*.

Термоэлектрические термометры ТХА-081 и ТХА-0515 с гильзой *6* (рис. 4-8-3) при установке на объектах приваривают к соответствующим бобышкам на паропроводах. У этих термометров нельзя извлечь термоэлектроды из защитной арматуры для их поверки или замены. Опыт эксплуатации показывает, что термоэлектрические термометры, у которых свободное пространство между изолированными электродами и защитной гильзой заполнено керамическим порошком, менее надежны.

4-9. Удлиняющие термоэлектродные провода

Выше отмечалось, что при измерении температуры термоэлектрическими термометрами в промышленных условиях необходимо вводить поправку на температуру свободных концов термометра.

Она может быть введена на основании расчетных данных (§ 4-4), если температура их постоянна, или автоматически. Применяемые способы автоматического введения поправки на температуру свободных концов будут рассмотрены в § 4-12 и 4-18.

Свободные концы термоэлектрического термометра стараются удалить от нагретых поверхностей трубопроводов, парогенератора, печи и т. д. в зону, где может быть установлено специальное устройство для поддержания постоянной температуры свободных концов термометра или установлен прибор, обеспечивающий автоматическое введение поправки. Для этого не следует ориентироваться на изготовление длинного термоэлектрического термометра в виде жесткого жезла. Целесообразнее ограничить размеры жесткой арматуры разумными пределами, обусловленными ее удобным монтажом, а продление электродов термометра сделать с помощью гибких удлиняющих проводов, которые обычно называют термоэлектродными или компенсационными[1]. Эти провода для ряда термометров могут быть изготовлены из тех же материалов, что и термоэлектроды термометра. В этом случае термоэлектродные провода обладают в области измеряемых температур такой же термоэлектрической характеристикой, как и сами электроды термоэлектрических термометров, с которыми они комплектуются.

Однако при применении некоторых термометров, например из благородных металлов, нельзя ориентироваться на термоэлектродные провода, сделанные из того же материала. Следует отметить, что к термоэлектродным проводам не предъявляется требований жаростойкости, которой должны обладать электроды термометров. Отсюда возникает естественная возможность подыскания для термоэлектродных проводов таких металлов, которые не являлись бы дефицитными и в интервале температур от 0 до 100°С развивали в паре между собой такую же термо-э. д. с. как и термоэлектрический термометр, с которым они комплектуются. Принятый интервал температуры достаточен, так как головка термометра в эксплуатационных условиях чаще всего не нагревается выше 60—80°С.

Таким образом, при применении термоэлектродных проводов свободными концами термометра можно считать места соединения термоэлектродных проводов с медными проводами или с зажимами измерительного прибора, если термоэлектродные провода присоединяются к ним непосредственно.

Рассмотрим принципиальную схему термоэлектрического комплекта, показанную на рис. 4-9-1. На этой схеме приняты следующие обозначения: A и B — электроды термометра; A_1 и B_1 — термоэлектродные провода; C — медные провода; t — температура рабочего конца термометра; t_1 — температура мест соединения электродов термометра с термоэлектродными проводами; t_0 — температура свободных концов термометра, т. е. в данном случае мест соединения

[1] Термин «компенсационные провода» неудачен, так как не отражает существа дела, поэтому в дальнейшем будем называть подобные провода термоэлектродными.

термоэлектродных проводов с медными проводами; *ИП* — измерительный прибор.

Термо-э. д. с. E рассматриваемой цепи

$$E = e_{AB}(t) + e_{BB_1}(t_1) + e_{B_1A_1}(t_0) + e_{A_1A}(t_1). \qquad (4\text{-}9\text{-}1)$$

Термо-э. д. с. того же термометра AB при тех же температурах рабочего и свободных концов, но без термоэлектродных проводов,

$$E_{AB}(t,\ t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0). \qquad (4\text{-}9\text{-}2)$$

Вычитая из уравнения (4-9-2) уравнение (4-9-1), получаем:

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E = e_{BA}(t_0) + e_{B_1B}(t_1) + e_{A_1B_1}(t_0) + e_{AA_1}(t_1). \qquad (4\text{-}9\text{-}3)$$

Принимая во внимание уравнение (4-2-5), из которого вытекает, что $e_{B1B}(t_1) + e_{AA1}(t_1) = e_{AB}(t_1) + e_{B1A1}(t_1)$, получаем:

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E = e_{AB}(t_1) + e_{BA}(t_0) - [e_{A_1B_1}(t_1) + e_{B_1A_1}(t_0)], \qquad (4\text{-}9\text{-}4)$$

или

$$E_{AB}(t,\ t_0) - E = E_{AB}(t_1,\ t_0) - E_{A_1B_1}(t_1,\ t_0). \qquad (4\text{-}9\text{-}5)$$

Если термоэлектрические характеристики термометра AB и пары, составленной из термоэлектродных проводов A_1B_1, одинаковы в интервале температур от $t_0 = 0°C$ до $t_1 = 100°C$, то

$$E_{AB}(t_1,\ t_0) = E_{A_1B_1}(t_1,\ t_0)$$

и, следовательно,

$$E_{AB}(t,\ t_0) = E.$$

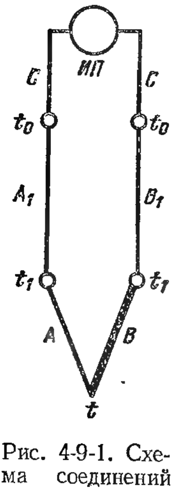


Рис. 4-9-1. Схема соединений измерительного прибора с термометром термоэлектродными проводами.

Таким образом, при включении термоэлектродных проводов, удовлетворяющих указанным выше требованиям, в цепь термоэлектрического термометра (рис. 4-9-1) паразитных термо-э. д. с. не возникает, а следовательно, и не искажается результат измерения. При этом температуры мест соединений термоэлектродов A и B с термоэлектродными проводами A_1 и B_1 должны быть одинаковыми, а абсолютное значение этой температуры в интервале от 0 до 100°C роли не играет. Кроме того, необходимо соблюдение полярности при подключении термоэлектродных проводов к термометру. При нарушении указанных условий могут иметь место значительные погрешности при измерении.

Основные характеристики стандартных удлиняющих термоэлектродных проводов (ГОСТ 1791-67), применяемых с серийно выпускаемыми термоэлектрическими термометрами, даны в табл. 4-9-1. Удельное электрическое сопротивление проволоки, применяемой для стандартных термоэлектродных проводов, приведено в табл. 4-7-4.

Таблица 4-9-1

Основные технические характеристики стандартных удлиняющих термоэлектродных проводов

Тип термоэлектрического термометра	Термоэлектродные провода				Обозначение проводов	Термо-э. д. с. в паре между жилами при температуре рабочего конца 100°С и свободных концов 0°С, мВ	Допускаемое отклонение значения термо-э. д. с., мВ
	Положительный		Отрицательный				
	Материал	Цвет оплетки	Материал	Цвет оплетки			
ТХК	Хромель	Фиолетовый	Копель	Желтый	ХК	6,95	± 0,20
ТХА	Медь	Красный	Константан	Коричневый	М	4,10	± 0,15
ТПП	Медь	Красный	Сплав ТП (99,4% Cu + + 0,6% Ni)	Зеленый	ПП	0,64	± 0,03

В некоторых случаях для термоэлектрических термометров ТХА, кроме указанных в табл. 4-9-1, применяют термоэлектродные провода с жилами из хромеля и алюмеля.

Для термоэлектрических термометров ТВР применяют термоэлектродные провода с жилами из меди и медно-никелевого сплава (98,2% Cu + 1,8% Ni).

4-10. Устройства для обеспечения постоянства температуры свободных концов термоэлектрических термометров

Как было сказано выше, при измерении температуры термоэлектрическими термометрами необходимо вводить поправку на изменение температуры свободных концов термометра. Чтобы эта поправка была в процессе измерений неизменной, места соединений свободных концов с медными проводами должны быть помещены в специальное устройство, обеспечивающее постоянство температуры.

При постоянной температуре свободных концов поправка может быть введена расчетным путем независимо от того, какой измерительный прибор применяется в комплекте с термоэлектрическим термометром.

В лабораторных условиях температуру свободных концов обычно поддерживают равной 0° С. Для этой цели свободные концы термоэлектрического термометра, спаянные с медными проводниками, погружают в стеклянные пробирки с небольшим количеством масла, помещенные в свою очередь в сосуд Дьюара, наполненный тающим льдом. При этом необходимо, чтобы свободные концы были погружены в лед на глубину не менее 100—150 мм.

Институтом полупроводников АН СССР разработан специальный полупроводниковый термостат для свободных концов термоэлектрических термометров, который позволяет автоматически поддерживать их температуру равной 0 ± 0,015°C. Термостат рассчитан на работу при температуре окружающего воздуха до +35°C. Полупроводниковая термобатарея термостата питается постоянным током напряжением 0,4 В от специального выпрямительного устройства. Мощность термобатареи равна 6,4 Вт. В настоящее время этот термостат серийно еще не изготовляется.

Если при измерении температуры не требуется высокая точность и при этом температура в помещении, где производятся измерения, не меняется заметно, то свободные концы термометра могут находиться при этой температуре, однако в этом случае их следует погрузить в сосуд, заполненный маслом, температура которого должна контролироваться с помощью стеклянного термометра. Этот способ поддержания постоянства температуры свободных концов позволяет контролировать их температуру с погрешностью ±0,2—0,5°C.

Простейшим стационарным устройством, позволяющим в известной мере стабилизировать температуру свободных концов и измерять ее, является коробка для свободных концов. Температуру свободных концов в этой коробке измеряют стеклянным жидкостным термометром или другим прибором. Этот способ стабилизации температуры свободных концов хотя и применяется в эксплуатационных условиях, но является далеко несовершенным.

В зарубежной практике для стабилизации температуры свободных концов термоэлектрических термометров широко применяют специальные термостаты с автоматическим поддержанием температуры. В качестве регулятора температуры обычно применяют простейший биметаллический терморегулятор. Поддерживаемая температура в термостате несколько выше, чем максимально возможная температура окружающей среды (обычно 40—50°C). Подобные термостаты обеспечивают постоянство температуры в пределах ±0,5—0,6°C.

4-11. Милливольтметры

Магнитоэлектрические милливольтметры широко применяют для измерения температур в комплекте с термоэлектрическими термометрами, а также с другими преобразователями, рассматриваемыми ниже.

Принцип действия и основы теории. Магнитоэлектрические милливольтметры основаны на использовании сил взаимодействия между постоянным током, протекающим по проводнику (обмотке подвижной рамки), и магнитным полем постоянного неподвижного магнита. Сила, действующая на проводник, направлена всегда нормально к направлению тока и к направлению магнитного поля. Для определения направления этой силы обычно пользуются правилом левой руки. Направление силовых линий проводника с током определяется известным правилом буравчика.

По закону Био—Савара сила F_1, действующая на находящийся в магнитном поле проводник длиною l, по которому протекает ток I, равна произведению длины проводника на магнитную индукцию B, силу тока и синус угла между направлением тока и направлением поля $\angle (l, B)$:

$$F_1 = lBI \sin (l, B).$$

Если проводник l перпендикулярен направлению магнитного поля, $\angle (l, B) = 90°$ и сила F_1 имеет максимальное значение:

$$F_1 = lBI. \tag{4-11-1}$$

Если проводник l совпадает с направлением магнитного поля, $\angle (l, B) = 0$, то он не испытывает со стороны поля никакого воздействия ($F_1 = 0$).

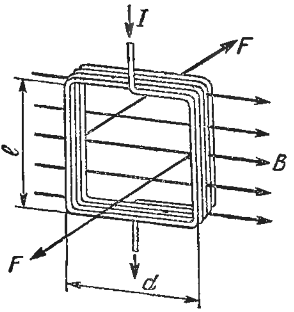


Рис. 4-11-1. Рамка в магнитном поле.

Обмотка подвижной рамки милливольтметра выполняется из нескольких десятков витков тонкой изолированной медной проволоки. Такая рамка, помещенная в равномерное и радиальное магнитное поле, показана на рис. 4-11-1. Если через обмотку рамки проходит ток I, то каждая активная сторона одного витка длиною l испытывает со стороны магнитного поля силу F_1, определяемую уравнением (4-11-1). Эта сила действует перпендикулярно к l и B, т. е. по касательной к окружности с радиусом $d/2$ (где d — ширина одного витка рамки), и если n — число витков обмотки рамки, то сила F, действующая на каждую сторону рамки, равна:

$$F = lnBI. \tag{4-11-2}$$

Вращающий момент, Н·м, действующий на рамку,

$$M = 2F\frac{d}{2} = dlnBI,$$

или

$$M = snBI = \psi I, \tag{4-11-3}$$

где d — ширина одного витка, равная средней ширине обмотки рамки, м; l — длина активной стороны каждого витка, равная средней активной длине стороны обмотки рамки, м; n — число витков обмотки рамки; B — магнитная индукция в воздушном цилиндрическом зазоре, Т; I — сила тока, протекающего в обмотке рамки, А; s — активная площадь обмотки рамки, м^2; ψ — удельный вращающий момент или момент на единицу тока, Н·м/А.

Чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовал определенный угол поворота рамки, необходимо приложить к системе второй момент, линейно возрастающий с углом отклонения

подвижной части, противоположный вращающему и не зависящий от измеряемой величины. При наличии такого противодействующего момента рамка будет поворачиваться до тех пор, пока моменты не станут равными друг другу.

Противодействующий момент создается за счет закручивания двух пружинок или двух растяжек. Спиральные пружинки или растяжки одновременно служат для подвода тока в обмотку рамки.

Значение противодействующего момента в том и другом случае прямо пропорционально углу закручивания φ, а следовательно, и углу поворота рамки:

$$M_{п} = W\varphi, \qquad (4\text{-}11\text{-}4)$$

где W — удельный противодействующий момент, Н·м/рад, т. е. момент пружинок или растяжек, отнесенный к единице угла поворота φ, который зависит от материала и размеров пружинок или растяжек.

При протекании тока через обмотку рамки подвижная часть будет находиться в равновесии при условии, что вращающий момент равен противодействующему:

$$M = M_{п} \text{ или } \psi I = W\varphi.$$

Из этого условия найдем зависимость между углом поворота подвижной части и током через обмотку рамки:

$$\varphi = \frac{\psi}{W} I = S_I I, \qquad (4\text{-}11\text{-}5)$$

где $S_I = \psi/W = \varphi/I$ — чувствительность измерительного механизма к току, рад/А.

Пользуясь уравнением (4-11-5), найдем зависимость между углом поворота подвижной части и напряжением U на зажимах прибора:

$$\varphi = \frac{\psi}{W} \frac{U}{R_{м}} = S_U U, \qquad (4\text{-}11\text{-}6)$$

где $R_{м}$ — внутреннее сопротивление милливольтметра, Ом.

Коэффициент

$$S_U = \frac{\psi}{W R_{м}} = \frac{S_I}{R_{м}} = \frac{\varphi}{U} \qquad (4\text{-}11\text{-}7)$$

определяет чувствительность измерительного механизма к напряжению, рад/В.

Необходимо отметить, что в формуле (4-11-7) U — напряжение на зажимах милливольтметра, а не измеряемая э. д. с., поэтому точнее называть S_U чувствительностью измерительного механизма к напряжению на зажимах. По отношению к чувствительности по току подобного указания не требуется, так как в неразветвленной цепи один и тот же ток течет через все элементы, в том числе и обмотку рамки.

Из уравнения (4-11-7) следует, что чувствительный к току прибор с большим внутренним сопротивлением не может обладать одновременно и высокой чувствительностью к напряжению. Милливольтметры, применяемые в комплекте с термоэлектрическими термометрами, обладают средней чувствительностью к напряжению, так как они являются высокоомными приборами, относящимися к группе милливольтметров с малым собственным потреблением мощности. Известно, что при измерении и цепях маломощных источников и, в частности, при измерении термо-э. д. с. термоэлектрических термометров большая мощность потребления прибора может значительно изменить режим цепи и значение термо-э. д. с., подлежащей измерению. Для милливольтметра потребляемая мощность

$$P=\frac{U^2}{R_м} \tag{4-11-8}$$

будет тем меньше, чем больше его сопротивление $R_м$. Для прибора, измеряющего силу тока, наоборот, чем меньше $R_м$, тем меньше потребляемая мощность.

Формулы (4-11-5) и (4-11-6) обычно называют уравнениями шкалы, из которых следует, что шкала милливольтметра, отградуированная в единицах напряжения, получается равномерной и что чувствительность его для любой отметки шкалы будет одна и та же.

При одном и том же угле поворота рамки φ перемещение указателя по шкале будет тем больше, чем больше расстояние L от оси подвижной части до шкалы, или, иначе говоря, при прочих равных условиях точность отсчета прямо пропорциональна L.

На практике длину указателя стрелочных милливольтметров обычно измеряют в миллиметрах, а угол отклонения подвижной части φ — в миллиметрах на миллиметр (1 мм/мм = 1 рад); тогда отклонение стрелки по круговой шкале будет равно длине дуги $l_к$ окружности с радиусом L:

$$l_к=L\varphi=mc, \tag{4-11-9}$$

где m — количество делений на длине дуги $l_к$; c — длина одного деления, мм.

В этом случае чувствительность стрелочного милливольтметра к напряжению выражается в миллиметрах (или делениях шкалы) на единицу напряжения на зажимах прибора:

$$S_U=\frac{L\varphi}{U}. \tag{4-11-10}$$

Величина, обратная чувствительности к напряжению, обозначается через C_U и называется постоянной по напряжению. Она численно равна напряжению на зажимах прибора, вызывающему отклонение стрелки на 1 мм (или на одно деление) шкалы:

$$C_U=\frac{1}{S_U}=\frac{U}{L\varphi}. \tag{4-11-11}$$

В милливольтметрах с световым указателем угол отклонения однократно отраженного зеркалом луча в 2 раза больше угла поворота рамки, и отклонение светового указателя по круговой шкале $l_к$ окружности с радиусом $L_л$ равно:

$$l_к = 2\varphi L_л. \tag{4-11-12}$$

Для милливольтметра со световым указателем чувствительность к напряжению выражается в тех же единицах, что и для стрелочных милливольтметров:

$$S_U = \frac{2L_л\varphi}{U}. \tag{4-11-13}$$

При выводе зависимости показаний милливольтметра от измеряемой величины нами предполагалось, что температура прибора не изменяется. В действительности же на показания милливольтметра влияет изменение температуры окружающей среды. Температурные погрешности, возникающие от изменения магнитной индукции постоянного магнита и упругих свойств пружинок или растяжек, создающих противодействующий момент, практически взаимно уничтожаются. Но изменение сопротивления медной обмотки рамки милливольтметра, происходящее вследствие отклонения температуры окружающего воздуха от нормальной, может явиться причиной изменений показаний прибора. Допустим, что милливольтметр измеряет некоторую постоянную термо-э. д. с. термоэлектрического термометра. При повышении температуры окружающей среды увеличение сопротивления медной обмотки рамки составляет 0,4% на 1°C, и ток, протекающий через нее, уменьшается. Это приводит к уменьшению вращающего момента милливольтметра, и, следовательно, при повышении температуры показания прибора уменьшаются на 0,4% на 1°C.

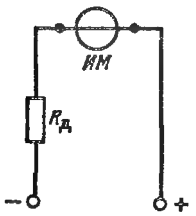


Рис. 4-11-2. Схема милливольтметра с добавочным манганиновым резистором.

Для уменьшения изменения показаний милливольтметра, вызываемого отклонением температуры окружающего воздуха от нормальной температуры 20 ± 5°C (или 20 ± 2°C) до любой температуры в пределах расширенной области (например, от 10 до 35°C), последовательно с медной обмоткой рамки $R_р$ измерительного механизма *ИМ* включают добавочный резистор $R_д$ из манганина (рис. 4-11-2). Температурный коэффициент электрического сопротивления манганина близок к нулю ($0,6 \cdot 10^{-5}$ на 1°C). Таким образом, сопротивление резистора $R_д$ практически не будет изменяться с температурой, а температурный коэффициент электрического сопротивления милливольтметра значительно уменьшится. Общее (внутреннее) сопротивление рассматриваемой схемы милливольтметра при 20°C равно:

$$R_м = R_р + R_д. \tag{4-11-14}$$

Определим температурный коэффициент электрического сопротивления милливольтметра с добавочным резистором (рис. 4-11-2). Положим, что при температуре $t_{20} = 20°C$ сопротивления обмотки рамки и милливольтметра соответственно равны $R_р$ и $R_м$, а при $t > t_{20}$ $R_{рt}$ и $R_{мt}$, тогда

$$R_{мt} = R_{рt} + R_д. \tag{4-11-15}$$

Обозначая через α температурный коэффициент электрического сопротивления материала обмотки рамки (для меди $\alpha = 4{,}25 \times 10^{-3}°C^{-1}$) [1], получаем:

$$R_{рt} = \frac{R_р(1+\alpha t)}{1+\alpha t_{20}}.$$

Подставляя значение $R_{рt}$ в уравнение (4-11-15) и принимая во внимание формулу (4-11-14), получаем:

$$R_{мt} = R_р \frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}} + R_м - R_р. \tag{4-11-16}$$

После простого преобразования это выражение принимает вид:

$$R_{мt} = R_м [1 + \alpha_м (t - t_{20})], \tag{4-11-17}$$

где

$$\alpha_м = \frac{R_р}{R_м} \frac{\alpha}{1+\alpha t_{20}} \tag{4-11-18}$$

— температурный коэффициент электрического сопротивления милливольтметра.

Пример. Милливольтметр класса точности 1,0 при 20°C имеет сопротивление $R_м = 300$ Ом, которое состоит из сопротивления обмотки рамки $R_р = 75$ Ом и добавочного манганинового сопротивления $R_д = 225$ Ом. Температурный коэффициент электрического сопротивления медной проволоки $\alpha = 0{,}00425 \cdot °C^{-1}$. Определим температурный коэффициент электрического сопротивления милливольтметра по формуле (4-11-18) или

$$\alpha_м = \frac{R_р}{R_м} \frac{\alpha}{1+\alpha t_{20}} = \frac{75}{300} \frac{0{,}00425}{1+0{,}00425 \cdot 20} = 0{,}00098°C^{-1}$$

или

$$\alpha = 0{,}98\% \text{ иа } 10°C.$$

В этом случае изменение показаний милливольтметра, вызванное отклонением температуры окружающего воздуха от нормальной температуры до любой температуры в пределах расширенной области, не превысит $\pm 1\%$ ($\pm 0{,}98\%$) нормирующего значения измеряемой величины на каждые 10°C изменения температуры.

Применяют также и другие способы уменьшения значения температурного коэффициента, например последовательно с обмоткой рамки и добавочным сопротивлением включают терморезистор, имеющий отрицательный температурный коэффициент электриче-

[1] Точное значение α для данной медной проволоки определяют опытным путем.

ского сопротивления. При увеличении температуры сопротивление цепи с терморезистором уменьшается на значение, близкое увеличению сопротивления обмотки рамки милливольтметра, так что общее его внутреннее сопротивление незначительно изменяется при изменении температуры окружающего воздуха.

Принципиальная электрическая схема милливольтметра с использованием цепи с добавочным терморезистором, например типа ММТ-8 (смесь окислов меди и марганца), показана на рис. 4-11-3, где *ИМ* — измерительный механизм; $R_{тр}$ — терморезистор; $R_ш$ — резистор из манганина, предназначенный для спрямления нелинейной характеристики терморезистора ММТ-8; $R_д$ — добавочный манганиновый резистор, служащий для подгонки до заданного значения $R_м$ прибора.

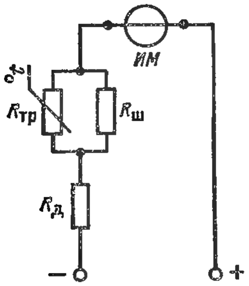


Рис. 4-11-3. Схема милливольтметра с использованием цепи с добавочным терморезистором.

Следует отметить, что этот способ по сравнению с первым позволяет при большом сопротивлении (числе витков) обмотки рамки прибора и одном и том же значении магнитной индукции в кольцевом зазоре получить меньшее значение температурного коэффициента электрического сопротивления милливольтметра. В этом случае изменение показаний милливольтметра при отклонении температуры окружающего воздуха от нормальной температуры до любой температуры в пределах расширенной области (например, от 5 до 50°С) не будет превышать, так же как и в первом случае, предела допускаемой основной погрешности прибора на каждые 10°С изменения температуры.

Измерительные механизмы милливольтметров. Ниже кратко рассмотрим измерительные механизмы милливольтметров, получившие наибольшее распространение. На рис. 4-11-4 показан измерительный механизм милливольтметра с внешним магнитом. Измерительный механизм с внешним магнитом состоит из малогабаритного постоянного магнита *2*, скрепленного с полюсными наконечниками *1* из магнитомягкой стали, неподвижного сердечника *9* также из магнитомягкой стали и подвижной рамки *8*. Обмотка рамки выполняется из нескольких десятков витков тонкой изолированной медной проволоки. Осью рамки служат два керна *6*, опирающихся на агатовые или корундовые подпятники, завальцованные в опорных винтах *5*. В воздушном зазоре создается равномерное радиальное магнитное поле в пределах рабочего угла поворота рамки вокруг сердечника.

Для отсчета показаний милливольтметра рамка снабжена легкой алюминиевой стрелкой *3*. Нерабочий конец стрелки имеет два усика с нарезкой, на которых расположены грузы *10*. С помощью этих грузов подвижная часть уравновешивается так, чтобы ее центр тяжести находился с достаточной точностью на оси вращения. В этом

случае на подвижную часть не будет действовать дополнительный момент от силы тяжести, и показания прибора не будут зависеть от его наклона в допускаемых пределах.

Ток в обмотку рамки подводится и отводится по спиральным пружинкам *7*, которые одновременно создают противодействующий момент. Спиральные пружинки, изготовленные из фосфористой бронзы или из других бронзовых сплавов, припаяны концом внутреннего витка к оси рамки, внешний же их конец припаян у нижней пружины к неподвижному штифту, а у верхней пружины — к поводку корректора нуля *4*.

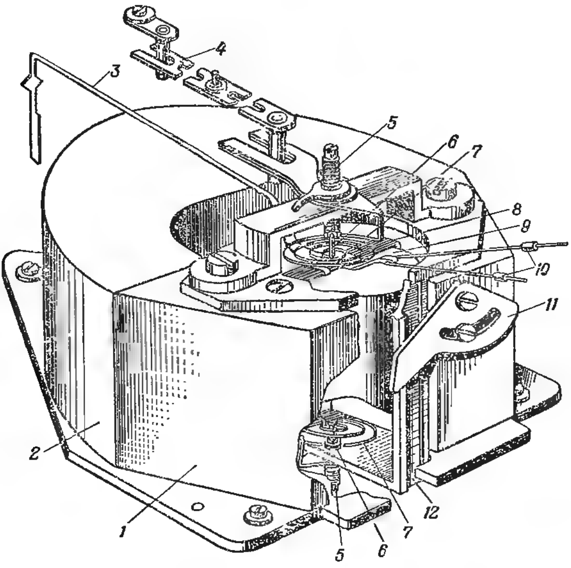


Рис. 4-11-4. Измерительный механизм милливольтметра с внешним постоянным магнитом.

Крепление сердечника, подвижной части, винтов с подпятниками и вилки корректора нуля осуществляется в обойме с мостиком *12*. Мостик и обойму, разделяющую полюсные наконечники, изготовляют из немагнитного материала.

Не менее важной деталью измерительного механизма является магнитный шунт (стальная пластина) *11*, перекрывающий с торца зазор между полюсными наконечниками, через который проходит часть (5—10%) магнитного потока. Перемещая шунт, можно менять значение ответвленного в него магнитного потока, а следовательно, и изменять в некоторых пределах магнитную индукцию в воздушном зазоре. Таким образом, магнитный шунт дает возможность регулировать номинальный угол отклонения подвижной части механизма и осуществлять подгонку верхнего предела измерения при заданном значении внутреннего сопротивления милливольтметра.

Подвижная часть измерительного механизма, установленная на кернах, может быть выполнена с вертикальной (рис. 4-11-4) и горизонтальной осью вращения рамки. Наибольшее распространение получили милливольтметры с вертикальной осью подвижной части измерительного механизма.

На рис. 4-11-5 показана подвижная часть милливольтметра на растяжках, где *1* — рамка; *2* — растяжки; *3* — пружины; *4* — букса; *5* — стрелка. Эта подвижная часть устанавливается в воздушном зазоре магнитопровода, так же как и подвижная часть на кернах (рис. 4-11-4). Растяжки, изготовляемые из бериллиевой бронзы и других сплавов (ГОСТ 9444-60), имеют форму плоских лент с большим отношением сторон (ширина 0,1—0,3 мм, толщина

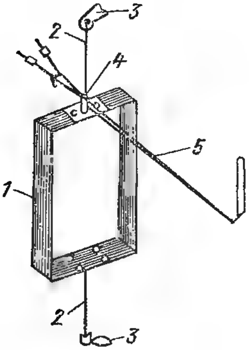


Рис. 4-11-5. Подвижная часть (рамка) милливольтметра на растяжках.

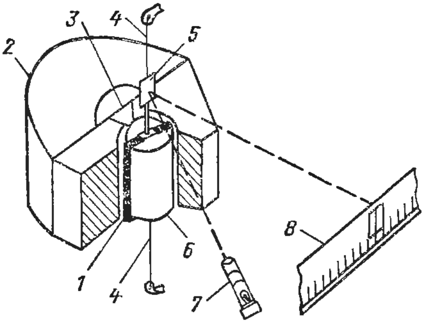


Рис. 4-11-6. Измерительный механизм со световым указателем.

0,01—0,025 мм). Они служат для подвода и отвода тока обмотки рамки и одновременно создают противодействующий момент.

Во избежание изменений напряжения лент растяжек при колебаниях температуры и для увеличения эластичности в аксиальном и радиальном направлениях они припаиваются со стороны обоймы к пружинам (обойма на рис. 4-11-5 не показана). Со стороны рамки растяжки крепятся в буксах, прикрепляемых непосредственно к рамке.

Показывающие милливольтметры с подвижной частью на растяжках, применяемые для измерения термо-э. д. с. термоэлектрических термометров, выполняются и со световым указателем. Основные узлы измерительного механизма с отсчетным устройством такого прибора показаны на рис. 4-11-6. Измерительный механизм включает в себя подвижную часть, состоящую из рамки *1* и зеркала *5*, малогабаритный постоянный магнит с полюсными наконечниками *2* и вкладышем *3* из немагнитного материала. Между полюсами помещен цилиндрический сердечник *6* из магнитомягкой стали, который обеспечивает получение радиального магнитного поля в зазоре. В зазоре вокруг сердечника в пределах рабочего угла может вращать-

ся рамка, закрепленная на растяжках *4*. Оптическая система с отсчетным устройством состоит из осветителя *7*, полупрозрачной шкалы *8* и зеркала. В диафрагме осветителя установлена нить, изображение которой проектируется на шкалу в виде теневого штриха на фоне светлого пятна. У приборов с таким отсчетным устройством угол отклонения однократно отраженного зеркалом луча (светового пятна с изображением нити) в 2 раза больше угла поворота рамки. Милливольтметры со световым указателем обеспечивают беспараллаксный отсчет показаний.

Следует отметить, что милливольтметры с подвижной частью на растяжках обладают высокой механической прочностью. В них нет кернов, которые изнашиваются в условиях незначительных вибраций или разрушают шлифованную поверхность подпятника.

Кроме рассмотренных механизмов милливольтметров применяют в настоящее время измерительные механизмы с внутрирамочным магнитом (рис. 4-11-7). Внутрирамочный магнит представляет собой неподвижный цилиндрический сердечник *1*. Место внешнего магнита здесь занимает магнитопровод *2*, выполненный в виде кольцевого ярма из магнитомягкой стали. Внутрирамочный магнит крепится к магнитопроводу с помощью обоймы *4* из немагнитного материала. Подвижная часть (рамка) *3* монтируется на кернах или растяжках.

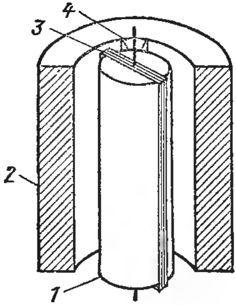


Рис. 4-11-7. Измерительный механизм с внутрирамочным магнитом.

Следует отметить, что поле внутрирамочного магнита неоднородно. Это делает их пригодными для применения в логометрах (гл. 5). При применении внутрирамочных магнитов в измерительных механизмах милливольтметров для получения однородного магнитного поля в зазоре в пределах рабочего угла магнит снабжают тонкими полюсными наконечниками.

У милливольтметров с внутрирамочным магнитом по сравнению с приборами, имеющими внешний магнит, на несколько порядков меньше как собственное поле рассеяния, так и воздействие внешних магнитных полей и ферромагнитных масс. Кроме того, измерительные механизмы с внутрирамочным магнитом позволяют уменьшить габариты милливольтметров. Недостатком этих измерительных механизмов милливольтметров является сложность изготовления магнитного шунта.

Конструктивные формы милливольтметров. Милливольтметры с подвижной частью на кернах разделяются на две подгруппы: с вертикальной и горизонтальной осью. Они конструктивно оформляются в виде показывающих приборов. Наибольшее распространение получили приборы с вертикальной осью. Милливольтметры с подвижной частью на растяжках конструктивно оформляются в виде показывающих, показывающих и самопишущих приборов.

В зависимости от назначения милливольтметры подразделяются на переносные и стационарные (щитовые) приборы. Для показывающих переносных приборов установлены классы точности 0,2; 0,5 и 1,0, а для стационарных приборов показывающих, показывающих и самопишущих — классы точности 0,5; 1,0; 1,5 и 2,5 (ГОСТ 9736-68). Класс точности 2,5 допускается только для показывающих миниатюрных милливольтметров с длиной шкалы менее 90 мм. Обозначение класса точности и внутреннее сопротивление прибора указываются обычно на его циферблате.

Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности и изменение показаний милливольтметров выражаются в единицах напряжения, обычно в милливольтах.

Переносные милливольтметры, предназначенные для работы с термоэлектрическими термометрами, изготовляются как с двойной градуировкой — в градусах Цельсия и в единицах напряжения (обычно милливольтах), так и с градуировкой только в милливольтах.

Милливольтметры переносные с двойной градуировкой могут быть использованы для непосредственного измерения температуры по шкале, отградуированной в градусах Цельсия при работе с термоэлектрическим термометром заданной градуировки, а при использовании милливольтовой шкалы приборы могут быть использованы для измерения термо-э. д. с. любого термоэлектрического термометра. Для шкалы, отградуированной в градусах Цельсия, обозначение градуировки и значение внешнего сопротивления (сопротивление соединительных проводов и термоэлектрического термометра) указывается на циферблате прибора.

Стационарные, показывающие и самопишущие милливольтметры, предназначенные для работы со стандартными термоэлектрическими термометрами, изготовляются с одной шкалой, отградуированной в градусах Цельсия для заданной градуировки. Пределы измерений и градуировки этих приборов должны выбираться в соответствии с требованиями ГОСТ 9736-68.

Изменение показаний милливольтметров, вызванное отклонением температуры окружающего воздуха от нормальной (20 ± 2°С для переносных и 20 ± 5°С для стационарных приборов) или обозначенной на циферблате прибора до любой температуры в пределах расширенной области не должны превышать предела допускаемой основной погрешности на каждые 10°С изменения температуры.

Рассмотрим некоторые типы и модификации стационарных милливольтметров. Показывающие милливольтметры типа М-64, МР-64-02 и МВР-6, выпускаемые Ереванским приборостроительным заводом, выполнены в плоскопрофильном металлическом корпусе и предназначены для утопленного монтажа на вертикальных щитах. На рис. 4-11-8 показан общий вид милливольтметра типа М-64. Принципиальная электрическая схема этого прибора приведена на рис. 4-11-3. Измерительные механизмы милливольтметров типа М-64 и МР-64-02 класса точности 1,5 выполнены с внутрирамочным

магнитом и подвижной частью на кернах. Милливольтметр МР-64-02 отличается от прибора М-64 только наличием двухпозиционного регулирующего устройства.

В милливольтметрах типа МВР-6 классов точности 1,0 и 1,5 (в зависимости от модификации) используется измерительный механизм с внешним магнитом и подвижной частью на растяжках. Плоскопрофильные корпусы приборов этого типа выполнены так же, как у милливольтметра М-64. Некоторые модификации приборов МВР-6 снабжаются двух- или трехпозиционным регулирующим устройством и устройством КТ для автоматической компенсации изменения термо-э. д. с. термоэлектрического термометра, вызываемого отклонением температуры свободных концов его от градуировочной $t_0 = 0°C$.

Милливольтметры узкопрофильные со световым указателем типа МВУ6 классов точности 0,5; 1,0 и 1,5 входят в унифицированный комплекс аналоговых сигнализирующих контактных приборов (АСК). Эти приборы в горизонтальном исполнении предназначены для утопленного монтажа на вертикальных щитах и пультах, в вертикальном исполнении для монтажа на горизонтальных и наклонных пультах с определенным углом наклона.

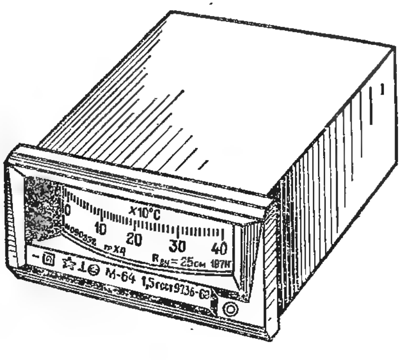


Рис. 4-11-8. Общий вид профильного милливольтметра типа М-64.

Приборы узкопрофильные со световым указателем изготовляются показывающие (модификация А), показывающие и сигнализирующие (модификация С), показывающие и позиционно регулирующие (трехпозиционные — модификация К, двухпозиционные с правым контактом — модификация КП, двухпозиционные с левым контактом — модификация КЛ). Милливольтметры МВУ6 выпускаются с односторонней, двусторонней и безнулевой шкалами. Все модификации приборов со световым указателем (например, типа МВУ6-51 и МВУ6-41 классов точности 0,5 и 1,0 соответственно), предназначенных для работы в комплекте со стандартными термоэлектрическими термометрами, снабжаются дополнительным устройством КТ.

Узкопрофильный милливольтметр со световым указателем типа МВУ6-51К (или МВУ6-41К) показан на рис. 4-11-9. Милливольтметр работает с дополнительным блоком определенного типа в комплекте с термоэлектрическим термометром. Приборы этого типа снабжаются фоторезисторами (СФ2-16), укрепленными на шторках и соединенными с контактами штепсельного разъема. Приборы модификаций К — имеют две шторки: зеленую и красную; КП — снабжены одной красной шторкой, несущей на себе фоторезисторы; КЛ — снабжены зеленой шторкой, несущей на себе фоторезисторы.

Принципиальная электрическая схема прибора МВУ6-51К (или МВУ6-41К) приведена на рис. 4-11-10, где *ИМ* — измерительный механизм магнитоэлектрический; *З* — зеркало; *Л* — лампа осветительная (ОЛ6-3); $R_{тр}$ — терморезистор ММТ-8; $R_{ш}$ — резистор манганиновый; $R_{д}$ — добавочный манганиновый резистор; R_4, R_8 — фоторезисторы, укрепленные на зеленой шторке; R_9, R_{13} — фоторезисторы, укрепленные на красной шторке. В приборах модификаций КЛ и КП устанавливаются также по четыре фоторезистора, в милливольтметрах модификаций *А* и *С* фоторезисторы не устанавливаются. В пределах заштрихованных участков *9* (зеленая шторка) и *7* (красная шторка) фоторезисторы освещены (рис. 4-11-9).

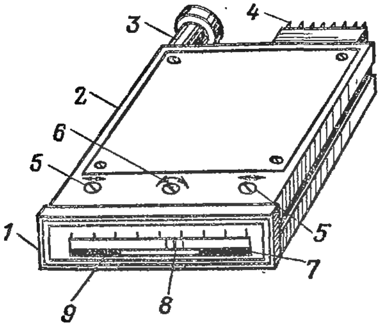


Рис. 4-11-9. Общий вид милливольтметра узкопрофильного со световым указателем типа МВУ6-51К (МВУ6-41К).

1 — наличник; *2* — корпус из алюминиевого сплава; *3* — патрон осветительной лампы; *4* — штепсельный разъемник; *5* — регуляторы установки шторок; *6* — корректор нуля; *7* — красная шторка; *8* — световой указатель; *9* — зеленая шторка.

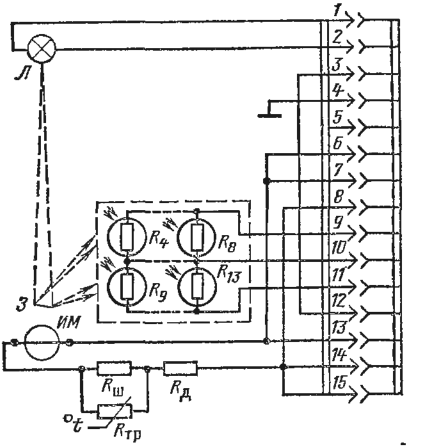


Рис. 4-11-10. Принципиальная электрическая схема милливольтметра типа МВУ6-51К (МВУ6-41К).

При отклонении светового указателя трехпозиционного прибора от начальной отметки до конца участка зеленой шторки указатель имеет зеленый цвет и освещены левые фоторезисторы R_4, R_8. Если указатель *8* находится между заштрихованными участками *9* и *7*, то все фоторезисторы затемнены, а световой указатель не окрашен. При достижении указателем начала участка красной шторки и далее цвет указателя станет красным и будут освещены правые фоторезисторы R_9, R_{13}. В момент достижения световым указателем установленного значения сопротивление освещенных фоторезисторов резко уменьшается, что и используется для управления внешними релейными устройствами. Выходной ток фоторезисторов в затемненном состоянии не более 30 мкА, а в освещенном состоянии не менее 250 мкА (при напряжении 10 В и напряжении накала лампы осветителя не более 5 В).

Погрешность срабатывания фотоконтактного устройства не превышает 1,0% (для приборов класса точности 0,5) и 1,5% (для

приборов класса 1,0) нормирующего значения измеряемой величины.

Для приборов МВУ6-51А (41А) с односторонней шкалой применяют блок БУ-11 с устройством КТ-3, а для приборов с безнулевой шкалой блок БУ-11 с устройством КТ-4, снабженным подавителем.

Милливольтметры узкопрофильные со световым указателем изготовляются большого габарита с размерами наличника 240 × 30 мм и длиной шкалы 200 мм, класса точности 0,5; среднего габарита с размером наличника 160 × 30 мм и длиной шкалы 120 мм, классов точности 0,5 и 1,0; малого габарита с размером наличника 100 × 30 мм и длиной шкалы 65 мм, классов точности 1,0 и 1,5. Приборы малого габарита могут быть использованы для измерения второстепенных параметров, а также для встраивания непосредственно в мнемосхемы.

Рассмотренная принципиальная электрическая схема милливольтметра, показанная на рис. 4-11-10, используется также в приборах МВУ-52 и МВУ6-42 классов точности 0,5 и 1,0, предназначенных для измерения, сигнализации или регулирования температуры в комплекте с термометрами сопротивления (гл. 5) и в приборах МВУ6-53 и МВУ6-43 классов точности 0,5 и 1,0 для работы с телескопами радиационных пирометров (гл. 7). Они работают в комплекте с дополнительным блоком, тип которого выбирается в зависимости от типа и модификации (А, С, К, КЛ, КП) прибора.

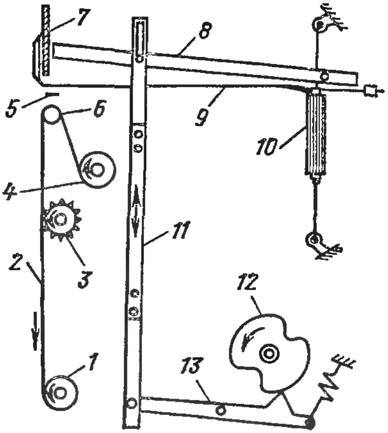


Рис. 4-11-11. Упрощенная кинематическая схема механизма одноточечного самопишущего милливольтметра.

Самопишущие милливольтметры применяются для измерения и записи температуры в одной точке и в нескольких (обычно 2—6) точках на одной диаграммной ленте. Одноточечные самопишущие милливольтметры могут быть выполнены с двух- или трехпозиционным регулирующим устройством, которое может быть использовано также и для сигнализации температуры. Измерительный механизм самопишущего прибора, разработанного НПО «Термоприбор», выполнен с внутрирамочным магнитом и подвижной частью на растяжках. Имеются самопишущие приборы, у которых в измерительном механизме используется внешний магнит.

Рассмотрим показанную на рис. 4-11-11 упрощенную кинематическую схему механизма одноточечного самопишущего милливольтметра. Основными узлами являются лентопротяжный механизм, служащий для продвижения диаграммной ленты *2*, и механизм записи показаний прибора на диаграммной ленте. Лентопротяжный

механизм включает в себя: катушку *4*, подающую диаграммную ленту; ведущий барабан *3* с направляющими штифтами, входящими в перфорационные отверстия диаграммной ленты; редуктор ведущего барабана (на схеме не показан), катушку *1*, принимающую отработанную диаграммную ленту. Направление движения диаграммной ленты показано стрелками. Механизм записи состоит из профильного кулачка *12*, который с помощью планки с собачкой *13* и кулисы *11* поднимает или опускает падающую дужку *8*.

Привод кинематической схемы осуществляется синхронным двигателем СД-2 посредством пары зубчатых колес. Двигатель и зубчатые колеса на рис. 4-11-11 не показаны. Как видно из схемы, собачка планки, прижимаемая пружиной, скользит по поверхности кулачка, который вращается с определенной скоростью. Благодаря этому периодически через каждые 20 с собачка планки попадает в углубление кулачка и опускает вниз кулису и падающую дужку. Последняя в свою очередь опускается на стрелку *9*, которая прижимает красящую ленту *5* к диаграммной ленте, в результате чего на ней отпечатывается одна цветная точка. В результате на диаграммной ленте, движущейся со скоростью 20, 40 или 80 мм/ч, получается точечная линия или кривая, характеризующая показания прибора за определенный промежуток времени.

В самопишущих приборах этого типа стрелка прижимает красящую ленту к диаграммной ленте, проходящей через прямолинейный направляющий валик *6*. Поэтому запись показываемой температуры прибором осуществляется в прямоугольных координатах, несмотря на то, что стрелка движется вдоль круговой шкалы *7* с радиусом, равным длине стрелки, закрепленной на рамке *10*.

В приборах, предназначенных для записи 2—6 точек, количество красящих лент равно числу точек. Красящие ленты монтируются на специальной раме-качалке, приводимой в действие от кулисы при ее подъеме посредством храповика и профилированного кулачка, имеющих общую ось. Кроме того, многоточечные приборы снабжают двухполюсным переключателем и указателем точек, показывающим порядковый номер подключенного термоэлектрического термометра и одновременно цвет красящей ленты для этой точки. Измерительная схема самопишущего милливольтметра выполнена аналогично показанной на рис. 4-11-3.

Пределы допустимой основной погрешности показаний самопишущего милливольтметра не превышают ±1%, а записи ±1,5% нормирующего значения измеряемой величины, выраженного в милливольтах.

Самопишущие милливольтметры предназначены для работы при температуре окружающего воздуха от 10 до 50°С и относительной влажности до 80% (при температуре 30°С), при отсутствии коррозионной среды. Приборы не могут быть использованы для работы во взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

4-12. Устройство КТ и схемы присоединения нескольких термоэлектрических термометров к одному милливольтметру

Устройство КТ. Устройство КТ предназначено для автоматической компенсации изменения термо-э. д. с. термоэлектрического термометра, вызываемого отклонением температуры свободных концов его от градуировочной $t_0 = 0°C$.

Принципиальная электрическая схема устройства КТ, включенного в цепь термоэлектрического термометра с милливольтметром, показана на рис. 4-12-1. На этой схеме приняты следующие обозначения: AB — термометр; A_1 и B_1 — термоэлектродные провода; t — температура рабочего конца термометра; t_1 — температура мест соединения электродов термометра с термоэлектродными проводами; t_0 — температура свободных концов термометра, т. е. мест соединения термоэлектродных проводов с медными проводами C; $R_д$ — добавочный манганиновый резистор в линии питания моста KT; $R_у$ — уравнительный манганиновый резистор для подгонки внешнего сопротивления милливольтметра M до заданного значения $R_{вн}$, включающего в себя сумму значений сопротивлений термоэлектрического термометра $R_т$, термоэлектродных проводов $R_{т.п}$, медных проводов $R_с$, приведенное сопротивление моста KT относительно зажимов ab, R_{ab} и $R'_у = R_у - (R_т + R_{т.п} + R_с + R_{ab})$.

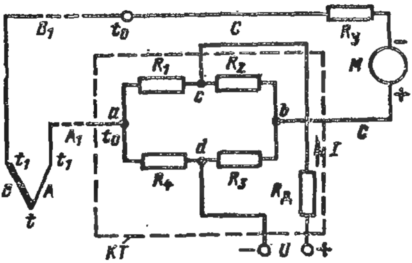


Рис. 4-12-1. Принципиальная электрическая схема устройства КТ, включенного в цепь термоэлектрического термометра с милливольтметром.

В простейшем виде устройство КТ представляет собой равноплечий мост, три плеча R_2, R_3 и R_4 которого выполнены из манганиновой проволоки, а плечо R_1 — из медной проволоки. Мост питается от источника стабилизированного напряжения, который на рис. 4-12-1 не показан.

При температуре 0°С мост уравновешен, напряжение U_{ab} на зажимах a и b равно нулю, а термо-э. д. с. термоэлектрического термометра соответствует градуировочному значению $E(t, t_0)$[1]. При изменении температуры окружающего воздуха, а следовательно, и температуры свободных концов термометра, например, до значения $t'_0 > t_0$, медный резистор R_1 также увеличивает свое сопротивление до значения R'_1. Вследствие этого нарушается равновесие моста и на зажимах a и b возникает напряжение U_{ab}, которое компенсирует изменение термо-э. д. с. термометра до значения $E(t, t_0) = E(t, t'_0) + U_{ab}$; здесь $E(t, t'_0)$ — термо-э. д. с. термометра при

---

[1] В устройствах КТ прежних разработок (например, КТ-54) мост уравновешен при температуре 20°С.

температуре свободных концов t'_0 и той же температуре t рабочего конца. Предполагается, что U_{ab} с достаточной степенью точности равно изменению термо-э. д. с. термометра $E(t'_0, t_0)$.

Значения компенсирующего напряжения U_{ab} и тока I могут быть определены по формулам

$$U_{ab} = I \frac{R'_1 R_3 - R_2 R_4}{R'_1 + R_2 + R_3 + R_4}, \quad (4\text{-}12\text{-}1)$$

где

$$I = \frac{U}{R_д + R_{cd}}; \quad (4\text{-}12\text{-}2)$$

$$R'_1 = R_1 (1 + \alpha t'_0); \quad (4\text{-}12\text{-}3)$$

$$R_{cd} = \frac{R_п (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}{R_п (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}; \quad (4\text{-}12\text{-}4)$$

здесь α — температурный коэффициент электрического сопротивления меди; t'_0 — измененная температура свободных концов термоэлектрического термометра; R_{cd} — приведенное сопротивление моста относительно зажимов c и d; $R_п$ — суммарное сопротивление милливольтметра, проводов и термометра.

Приведенное сопротивление моста относительно зажимов a и b определяется по формуле

$$R_{ab} = \frac{R_д (R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}{R_д (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (4\text{-}12\text{-}5)$$

Если милливольтметр имеет безнулевую шкалу, то схема моста устройства КТ усложняется. В схему устройства КТ должен быть включен элемент (подавитель), позволяющий получить дополнительное компенсирующее напряжение $U_{нк}$ необходимого знака, равное термо-э. д. с. термометра $E(t_н, t_0)$, соответствующей температуре рабочего конца $t_н$ (начальная отметка шкалы) и температуре свободных концов $t_0 = 0$°С.

Такими блоками, состоящими из устройств КТ и подавителя, снабжаются выпускаемые милливольтметры, например рассмотренные выше приборы типа МВУ6-51А и МВУ6-41А.

Для изготовляемых в настоящее время различных модификаций устройств КТ погрешность компенсации изменения термо-э. д. с. термометра, вызываемого отклонением температуры свободных концов ее от градуировочного значения $t_0 = 0$°С до $t'_0 = 50$°С, не превышает для термометров ТПП, ТХА и ТХК ±0,017; ±0,12 и ±0,20 мВ соответственно или ±3°С.

Схемы присоединения нескольких термоэлектрических термометров к одному милливольтметру. Для уменьшения числа показывающих милливольтметров, а вместе с тем и для осуществления измерений температур с помощью термоэлектрических термометров в технологических линиях и объектах по вызову применяют специальные переключатели (на 4, 6, 8, 12, 20 и более точек), позволяющие поочередно присоединять термометры или любой из них к одному милливольтметру.

Схемам присоединения термоэлектрических термометров к переключателю, милливольтметру и в особенности устройству соеди-

нительных линий должно уделяться большое внимание, так как ток, протекающий в линии, незначителен (максимум 0,2—0,3 мА). Поэтому необходимо заботиться о надежной изоляции всех соединительных проводов, об отсутствии заземлений в линии и, наконец, о хороших контактах в местах соединений. Кроме того, сопротивление внешней цепи милливольтметра должно соответствовать заданному значению $R_{вн}$.

Для термоэлектрических термометров должны применяться двухполюсные тщательно изготовленные переключатели. Желательно, чтобы переходное электрическое сопротивление каждой пары контактов переключателя не превышало 0,01 Ом. Применять однополюсные переключатели не рекомендуется ввиду возможности заземления или электрического контакта между отдельными термо-

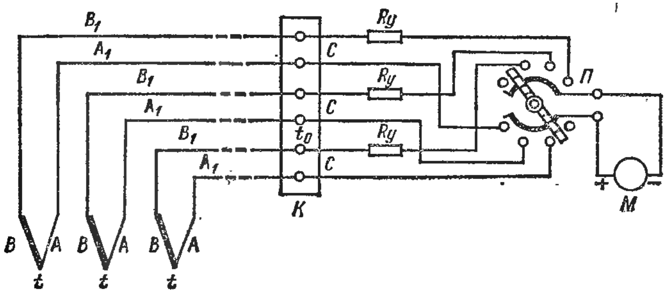


Рис. 4-12-2. Схема присоединения показывающего милливольтметра в свободные концы термоэлектрических термометров с помощью переключателя.

метрами через металлические поверхности технологического оборудования, так как рабочие концы термометров могут быть не изолированы от металлических защитных гильз. Винтовые зажимы у милливольтметров и т. п. должны быть достаточно надежными и содержаться в чистоте.

У самопишущих милливольтметров переключатель обычно встроен в корпус прибора. Переключатели, предназначенные для включения термоэлектрических термометров по вызову на один и тот же показывающий милливольтметр, выпускаются нескольких типов. Если шкала милливольтметра отградуирована в градусах Цельсия, то к прибору можно присоединить только термометры с равным сопротивлением внешней цепи и одной и той же градуировки.

Простейшая схема присоединения трех термометров к показывающему милливольтметру M через переключатель $П$ показана на рис. 4-12-2, где K — специальная коробка, в которой температура свободных концов термоэлектрического термометра t_0 должна контролироваться с помощью вспомогательного термометра (на схеме не показан). Эта схема присоединения термометров к одному

милливольтметру может быть использована для неответственных измерений температуры.

На рис. 4-12-3 приведена схема присоединения трех термоэлектрических термометров к показывающему милливольтметру *М*, включаемому в термоэлектрод *В* с использованием переключателя *П* и дополнительного блока *Б*, состоящего из устройства *КТ* и источника стабилизированного напряжения *ИСН*. Обозначения других элементов схемы соответствуют принятым выше.

Внутри соединительной коробки *КС* места соединений термоэлектродных проводов A_1 и B_1 с медными *С* должны иметь одну и ту же температуру t_1, абсолютное значение которой роли не играет.

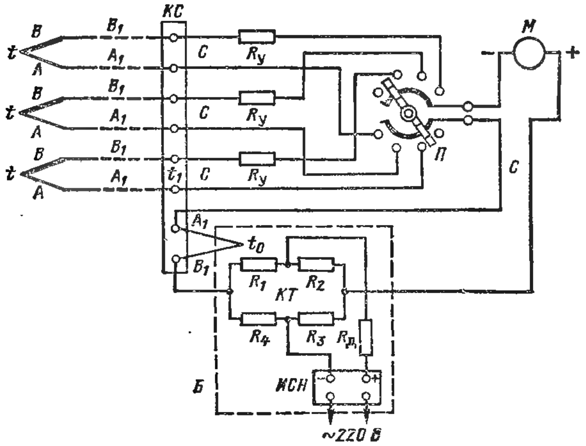


Рис. 4-12-3. Схема присоединения показывающего милливольтметра в термоэлектрод термоэлектрических термометров с использованием переключателя и дополнительного блока.

Включение милливольтметра с помощью переключателя в электрод *В* термоэлектрического термометра позволяет сократить протяженность линий из термоэлектронных проводов и использовать устройство *КТ*, рассчитанное на присоединение одного термометра, для двух, трех и более термометров одной и той же градуировки. По такой же схеме целесообразно присоединять термоэлектрические термометры и блок *Б* к переключателю самопишущего многоточечного милливольтметра.

Если дополнительный блок *Б*, состоящий из устройства *КТ* и источника стабилизированного напряжения *ИСН*, будет рассчитан на присоединение нескольких термоэлектрических термометров, то возможно осуществить присоединение милливольтметра к свободным концам термометров, что, однако, менее экономично, чем присоединение по схеме рис. 4-12-3.

4-13. Измерение термо-э. д. с. милливольтметром

При измерении термо-э. д. с. термоэлектрического термометра милливольтметром необходимо учитывать собственное потребление мощности прибором. Если термо-э. д. с., развиваемая термометром, равна $E_{AB}(t, t_0)$, то ток I, возникающий в цепи, состоящей из милливольтметра M с присоединенным к нему с помощью термоэлектродных A_1B_1 и медных проводов термометром AB (рис. 4-13-1), определяется уравнением

$$I = \frac{E_{AB}(t, t_0)}{R_м + R_{т.п} + R_т + R_у}, \qquad (4\text{-}13\text{-}1)$$

где $R_м$ — внутреннее сопротивление милливольтметра при 20°C, Ом; $R_{т.п}$ — сопротивление термоэлектродных проводов A_1B_1 при 20°C, $R_т$ — сопротивление термоэлектрического термометра AB при 20°C, Ом; $R_у$ — сопротивление подгоночного манганинового резистора, Ом; $R_п$ — сопротивление медных проводов при 20°C, Ом.

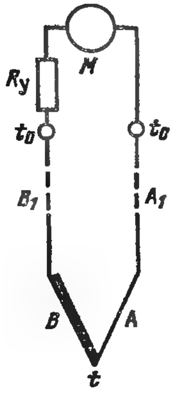


Рис. 4-13-1. Схема соединений милливольтметра с термоэлектрическим термометром термоэлектродными проводами.

Заданное значение внешнего сопротивления милливольтметра равно:

$$R_{вн} = R_т + R_{т.п} + R_у + R_п. \qquad (4\text{-}13\text{-}2)$$

Выражая напряжение на зажимах милливольтметра

$$U_{ab} = IR_м$$

через значение тока I по уравнению (4-13-1) и учитывая (4-13-2), получаем:

$$U_{ab} = \frac{E_{AB}(t, t_0) R_м}{R_м + R_{вн}},$$

откуда

$$U_{ab} = E_{AB}(t, t_0) - U_{ab}\frac{R_{вн}}{R_м}. \qquad (4\text{-}13\text{-}3)$$

Таким образом, напряжение на зажимах милливольтметра всегда меньше, чем термо-э. д. с., развиваемая термометром, на значение, равное падению напряжения во внешней цепи, т. е. на $U_{ab}\frac{R_{вн}}{R_м} = IR_{вн}$. Падение напряжения тем меньше, чем больше внутреннее сопротивление милливольтметра по сравнению с его внешним сопротивлением $R_{вн}$. Поэтому, как отмечалось выше, внутреннее сопротивление милливольтметров делается достаточно большим.

Ниже приводится пример оценки предельной погрешности измерения температуры среды милливольтметром в комплекте с термоэлектрическим термометром при нормальных условиях.

Пример. Определим приближенное значение предельной погрешности измерения температуры перегретого водяного пара показывающим милливольтметром типа МВУ6-51А класса точности 0,5 со шкалой 200—600°С (градуировка ХА) в комплекте с термоэлектрическим термометром ТХА и дополнительным блоком БУ-11 (вариант схемы устройства КТ-4) при нормальных условиях. Милливольтметр показывает температуру пара 540°С.

Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности показаний милливольтметра при диапазоне измерения $E_д = 16{,}78$ мВ равны:

$$\Delta E_м = \pm \frac{\delta E_д}{100} = \pm \frac{0{,}5 \cdot 16{,}78}{100} = \pm 0{,}083 \approx \pm 0{,}08 \text{ мВ},$$

что соответствует (табл. П4-7-3)

$$\Delta t_м = \pm 2°C \quad \text{или} \quad \delta_м = \pm \frac{\Delta t_м}{t} 100 = \pm \frac{2 \cdot 100}{540} = \pm 0{,}37\%.$$

Допускаемое отклонение термо-э. д. с. термоэлектрического термометра ТХА от значений градуировочной таблицы согласно табл. 4-7-3 равно:

$$\Delta E_т = \pm [0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4}(t - 300)] =$$
$$= \pm [0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4}(540 - 300)] = \pm 0{,}208 \approx \pm 0{,}21 \text{ мВ},$$

что соответствует (табл. П4-7-3) $\Delta t_т = \pm 5{,}3°C$, или

$$\delta_т = \pm \frac{\Delta t_т}{t} 100 = \pm \frac{5{,}3 \cdot 100}{540} = \pm 0{,}98\%.$$

Допускаемое отклонение э. д. с. в паре между жилами термоэлектродных проводов согласно табл. 4-9-1 равно $\Delta E_{т.п} = \pm 0{,}15$ мВ, что соответствует (табл. П4-7-3) $\Delta t_{т.п} = \pm 3{,}8°C$, или

$$\delta_{т.\,п} = \pm \frac{\Delta t_{т.\,п}}{t} 100 = \pm \frac{3{,}8 \cdot 100}{540} = \pm 0{,}70\%.$$

Пределы допускаемой погрешности устройства КТ-4 не более $\pm 3°C$, или

$$\delta_{к.\,т} = \pm \frac{3 \cdot 100}{540} = \pm 0{,}55\%.$$

Приближенное значение предельной погрешности показаний для комплекта определяется по формуле

$$\delta_к = \pm \sqrt{\delta_м^2 + \delta_т^2 + \delta_{т.\,п}^2 + \delta_{к.\,т}^2} = \pm \sqrt{0{,}37^2 + 0{,}98^2 + 0{,}70^2 + 0{,}55^2} =$$
$$= \pm 1{,}37 \approx \pm 1{,}4\% \quad \text{или} \quad \Delta t_к = \pm 7{,}6 \approx \pm 8°C.$$

Применяемая в этом примере методика оценки предельной погрешности показаний для комплекта хорошо согласуется с опытными данными. Погрешность комплекта по опытным данным по сравнению с расчетным значением меньше примерно на 15—18%. Однако вероятность значения погрешности $\delta_к$ остается невыясненной.

При измерении температуры милливольтметром в комплекте с термоэлектрическим термометром в эксплуатационных условиях возможно изменение погрешности, так как внутреннее сопротивление милливольтметра, а также внешнее сопротивление его могут в процессе измерения изменяться в зависимости от ряда обстоятельств. Внутреннее сопротивление милливольтметра $R_м$ зависит от температуры окружающего воздуха. Сопротивление соединительных проводов $R_{т.\,п}$ изменяется в зависимости от температуры воздуха в помещении и поверхностей нагрева оборудования, если провода проложены вблизи них. Сопротивление термоэлектродов погружен-

ной части термометра изменяется в зависимости от его нагрева средой, а сопротивление термоэлектродов непогруженной части может изменяться вследствие изменения температуры окружающего ее воздуха.

Выше было установлено, что показания милливольтметра пропорциональны силе тока, протекающего через обмотку его рамки:

$$\varphi = S_I I.$$

После подстановки в формулу значения I из уравнения (4-13-1) получим:

$$\varphi = S_I \frac{E_{AB}(t,\ t_0)}{R_{\text{м}} + R_{\text{т.п}} + R_{\text{т}} + R_{\text{у}}}$$

или полагая $R = R_{\text{м}} + R_{\text{т.п}} + R_{\text{т}} + R_{\text{у}}$

$$\varphi = S_I \frac{E_{AB}(t,\ t_0)}{R}, \tag{4-13-4}$$

т. е. показание прибора пропорционально термо-э. д. с. термометра и обратно пропорционально полному сопротивлению цепи термоэлектрического комплекта.

Определим зависимость показаний милливольтметра от изменения внутреннего сопротивления и сопротивления внешней цепи его. Положим, что внешнее сопротивление, которое при температуре 20°C, принятой при градуировке прибора, равно $R_{\text{вн}}^{\text{гр}}$, а в условиях эксплуатации изменилось и стало равным $R_{\text{вн}}^{\text{эк}}$. Далее положим, что при температуре 20°C сопротивление милливольтметра было равно $R_{\text{м}}^{\text{гр}}$, а в условиях эксплуатации при температуре $t_{\text{эк}}$ стало равным $R_{\text{м}}^{\text{эк}}$.

Если бы милливольтметр и внешняя его цепь находились в условиях, соответствующих условиям градуировки, то показание его было бы равно:

$$\varphi_{\text{гр}} = S_I \frac{E_{AB}(t,\ t_0)}{R_{\text{гр}}}, \tag{4-13-5}$$

где $R_{\text{гр}} = R_{\text{м}}^{\text{гр}} + R_{\text{вн}}^{\text{гр}}$.

В условиях эксплуатации показание прибора равно:

$$\varphi_{\text{эк}} = S_I \frac{E_{AB}(t,\ t_0)}{R_{\text{эк}}}, \tag{4-13-6}$$

где $R_{\text{эк}} = R_{\text{м}}^{\text{эк}} + R_{\text{вн}}^{\text{эк}}$.

Определим относительное изменение показаний прибора, связанное с изменением полного сопротивления цепи термоэлектрического комплекта:

$$\frac{\varphi_{\text{эк}} - \varphi_{\text{гр}}}{\varphi_{\text{гр}}} = \frac{R_{\text{гр}} - R_{\text{эк}}}{R_{\text{эк}}}. \tag{4-13-7}$$

Уравнение (4-13-7) является приближенным, так как оно получено без учета нелинейной зависимости термо-э. д. с. термометра от температуры.

Значение относительного изменения показаний прибора, определяемое по уравнению (4-13-7), можно уменьшить, если он будет установлен на щите в специальном помещении, в котором температура воздуха близка к нормальной (20 ± 5°С).

Для уменьшения изменения показаний милливольтметра, вызываемого отклонением сопротивления внешней цепи от заданного значения $R_{вн}$ (например, 5, 15, 25 Ом), целесообразно температурную шкалу прибора наносить с учетом повышения сопротивления термоэлектродов термометра при заданной глубине его погружения. Это необходимо особенно при применении термоэлектрических термометров платиновой группы, так как, например, сопротивление 1 м платинородий-платиновых термоэлектродов диаметром 0,5 мм возрастает от 1,53 Ом при 20°С до 4,59 Ом при 1000°С.

Кроме изменений показаний прибора, связанных с изменением сопротивления внешней цепи и сопротивлением самого милливольтметра, необходимо учитывать также возможные влияния от электростатических сил и магнитных полей.

Влияние электростатических сил вызывается появлением на поверхности стекла наличника прибора заряда, например при протирании стекла сухой тряпкой. Заряд на сухом стекле держится довольно долго и отклоняет стрелку на значительный угол вдоль шкалы. Протирая стекла прибора, целесообразно тряпку немного увлажнять, так как влага создает проводящий слой и позволяет заряду стечь.

Внешние магнитные поля в значительно большей степени искажают показание милливольтметров, измерительный механизм которых имеет внешний магнит, по сравнению с приборами, имеющими внутрирамочный магнит. Даже поставленные рядом два неэкранированных милливольтметра (пластмассовый корпус и внешний магнит) влияют друг на друга и дают неверные показания. Искажения магнитного поля милливольтметра могут иметь место также вследствие близкого соседства ферромагнитных масс. Поэтому щитовые милливольтметры градуируются с учетом влияния стального щита. Эти приборы должны иметь надпись «Монтировать на стальном щите» (ГОСТ 9736-68). Приборы, предназначенные для установки не на стальном щите, должны иметь надпись «Не монтировать на стальном щите».

Борьба с возможным искажением магнитного поля ведется также экранированием милливольтметра, если его корпус изготовлен из пластмассы. Изготовляются также приборы с металлическим корпусом, который является одновременно и экраном. Вопрос об установке нескольких милливольтметров в блоке (общем корпусе) на стальном щите решается экспериментально для каждого случая в отдельности. Для неэкранированных переносных приборов, устанавливаемых рядом, расстояние между осями подвижной части должно быть не менее 300 мм.

4-14. Компенсационный метод измерения термо-э. д. с.

Компенсационный метод широко применяется для измерения термо-э. д. с. термоэлектрических термометров, напряжения, а также других величин, связанных с напряжением определенной зависимостью.

Принцип компенсационного метода основан на уравновешивании (компенсации) измеряемой э. д. с. известным напряжением, получаемым от строго определенного тока, называемого обычно рабочим, на сопротивлении с известным значением.

Рассмотрим принципиальную схему, иллюстрирующую компенсационный метод измерения термо-э. д. с., которая показана на рис. 4-14-1. Уравновешивающее падение напряжения создается рабочим током I на реохорде (компенсационном резисторе) $R_р$. При этом сопротивление компенсационной цепи должно быть неизменным, а источник питания должен обеспечивать неизменным во время измерения рабочий ток I. Вдоль компенсационного резистора $R_р$ может перемещаться скользящий контакт — движок b, который с помощью провода соединен с одним зажимом переключателя $П$. К зажиму a реохорда $R_р$ присоединен один зажим нулевого прибора $НП$, второй его зажим присоединен к переключателю $П$. Таким образом, с помощью переключателя нулевой прибор можно включить в цепь термоэлектрического термометра AB или нормального элемента $НЭ$ с э. д. с. $E_{НЭ}$.

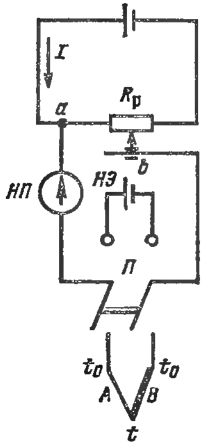


Рис. 4-14-1. Принципиальная компенсационная измерительная схема с использованием нормального элемента.

При измерении термо-э. д. с. $E(t, t_0)$ нулевой прибор включают в цепь термометра и перемещают движок b до тех пор, пока указатель нулевого прибора не установится на нулевой отметке шкалы. При выполнении этого условия падение напряжения на части реохорда $R_р$ будет равно измеряемой термо-э. д. с. $E(t, t_0)$. В этом случае имеет место равенство

$$E(t, t_0) = IR'_р, \qquad (4\text{-}14\text{-}1)$$

где $R'_р$ — сопротивление участка ab.

Включив затем нулевой прибор в цепь $НЭ$ с э. д. с. $E_{НЭ}$ вместо термоэлектрического термометра, мы установим, что в этом случае при том же рабочем токе I указатель нулевого прибора не будет отклоняться от нулевой отметки при ином положении движка b, так что сопротивление участка ab будет равно $R_к$. При этом имеет место равенство

$$E_{НЭ} = IR_к. \qquad (4\text{-}14\text{-}2)$$

Признаком уравновешивания или компенсации в том и другом случае является отсутствие тока в цепи нулевого прибора.

Разделив почленно уравнения (4-14-1) и (4-14-2), получим:

$$\frac{E(t,\ t_0)}{E_{\text{НЭ}}} = \frac{R'_{\text{р}}}{R_{\text{к}}},$$

откуда

$$E(t,\ t_0) = E_{\text{НЭ}} \frac{R'_{\text{р}}}{R_{\text{к}}}, \qquad (4\text{-}14\text{-}3)$$

т. е. измеряемая термо-э. д. с. сравнивается с образцовой мерой — э. д. с. нормального элемента.

Рассмотренный компенсационный метод измерения термо-э. д. с. положен в основу принципа действия приборов, которые называются потенциометрами с постоянной силой рабочего тока.

4-15. Нормальные элементы

Известно, что при постоянной концентрации электролита и неизменной температуре э. д. с. гальванической цепи является весьма стабильной. Это и явилось основанием для создания нормальных элементов (НЭ), применяемых в измерительной технике в качестве рабочих и образцовых мер э. д. с., а также для осуществления первичного эталона единицы напряжения — вольта.

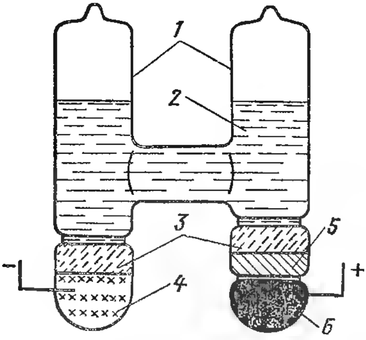


Рис. 4-15-1. Схема устройства насыщенного нормального элемента с жидким электролитом.

1 — стеклянная оболочка Н-образной формы; *2* — насыщенный раствор сульфата кадмия; *3* — кристаллы сульфата кадмия; *4* — амальгама кадмия; *5* — сульфат ртути (*I*); *6* — ртуть.

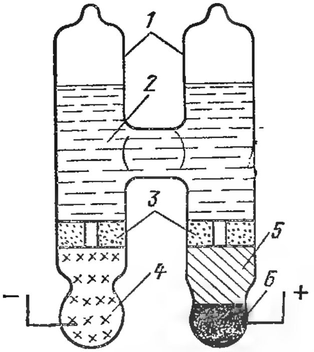


Рис. 4-15-2. Схема устройства ненасыщенного нормального элемента с жидким электролитом.

1 — стеклянная оболочка Н-образной формы; *2* — ненасыщенный раствор сульфата кадмия; *3* — кольцо защитное; *4* — амальгама кадмия; *5* — сульфат ртути (*I*); *6* — ртуть.

Нормальный элемент является обратимым гальваническим элементом, образованным соединением двух полуэлементов, выполненных по определенной схеме гальванической цепи из химически чистых веществ. В зависимости от степени концентрации электролита НЭ, изготовляемые с 1/I 1977 г. (ГОСТ 1954-75), разделяются на насыщенные и ненасыщенные.

Схема устройства насыщенного рабочего НЭ с жидким электролитом показана на рис. 4-15-1. В нижней части каждой из ветвей оболочки имеются впаянные электроды «+» и «—». Для предохранения составных частей нормального эле-

мента от смешения в его оболочке сделаны две крутые перетяжки в катодной ветви и одна в анодной. Рабочие НЭ имеют четыре класса точности.

Схема устройства ненасыщенного НЭ с жидким электролитом показана на рис. 4-15-2.

Основные технические данные НЭ, изготовляемых по ГОСТ 1954-75, приведены в табл. 4-15-1.

Таблица 4-15-1

Основные технические данные НЭ (ГОСТ 1954-75)

Тип НЭ	Класс точности	Значение э. д. с. при температуре 20°С, В		Нестабильность э. д. с., мкВ, не более		Рабочая температура, °С
		При выпуске из производства	При эксплуатации	за 1 год	за 3 дня	
Насыщенные	0,0005 0,001 0,002 0,005	От 1,018590 до 1,018700	От 1,018540 до 1,018730	5,0 10,0 20,0 50,0	1,0 2,0 4,0 10,0	19—21 18—22 18—24 10—40
Ненасыщенный	0,002 0,005 0,01 0,02	От 1,019000 до 1,019600	От 1,018800 до 1,019600	20,0 50,0 100,0 200,0	4,0 10,0 20,0 40,0	10—40 10—40 5—40 5—50

Значение э. д. с. E_t насыщенных НЭ при всех рабочих температурах, отличных от 20°С, определяется по формуле

$$E_t = E_{20} - [40{,}6\,(t-20) + 0{,}95\,(t-20)^2 - 0{,}01\,(t-20)^3] \cdot 10^{-6}, \qquad (4\text{-}15\text{-}1)$$

где E_{20} — значение э. д. с. при температуре 20°С, указанное в паспорте на НЭ, В.

Отклонение Δ_E измеренного значения э. д. с. насыщенного НЭ от значения, рассчитанного по формуле (4-15-1), не должно превышать значения

$$\Delta_E \leqslant |\Delta\,(t-20)|, \qquad (4\text{-}15\text{-}2)$$

где Δ — допускаемое отклонение э. д. с. на 1°С, которое не должно превышать 2 мкВ · °С$^{-1}$ в диапазоне от 20 до 40°С и 3 мкВ · °С$^{-1}$ в диапазоне от 10 до 20°С.

Таблица 4-15-2

Основные технические данные НЭ (ГОСТ 1954-64)

Тип НЭ	Класс точности	Значение э. д. с. при температуре 20°С, В		Допускаемое изменение э. д. с., мкВ		Температура применения, °С
		от	до	за 1 год	за 3 дня	
Насыщенный	0,001 0,002 0,005	1,01859 1,01856 1,01850	1,01863 1,01866 1,01870	10 20 50	5 10 30	20 ± 0,5 20 ± 2 10 — 40
Ненасыщенный	0,02	1,0186	1,0194	200	70	5 — 55

При применении ненасыщенных НЭ температуру их обычно не измеряют. Средний температурный коэффициент этих НЭ в диапазоне температур от 10 до 40°С не превышает 5 мкВ · °С$^{-1}$, а в диапазоне от 5 до 10°С и от 40 до 50°С — 10 мкВ · °С$^{-1}$.

При работе с рассмотренными НЭ необходимо руководствоваться паспортом и инструкцией по эксплуатации, прилагаемыми к ним.

Внутреннее сопротивление НЭ постоянному току вновь изготовленных не превышает: 1000 Ом для НЭ с площадью электродов 50 мм² и более; 2000 Ом для НЭ с площадью электродов менее 50 мм². Со временем внутреннее сопротивление НЭ увеличивается, но не более чем на 1000 Ом. Это, однако, не оказывает влияния на значение его э. д. с.

В табл. 4-15-2 приведены основные технические данные НЭ, изготовляемых по ГОСТ 1954-64.

Следует отметить, что насыщенные НЭ нельзя даже кратковременно, в течение 1 мин, нагружать током более 1 мкА, а ненасыщенные — более 10 мкА.

4-16. Потенциометры переносные и лабораторные

Потенциометры переносные и лабораторные с постоянной силой рабочего тока получили широкое применение в практике теплотехнических измерений. Они обеспечивают большую точность, так как, определяя измеряемую термо-э. д. с., как было сказано выше, мы исходим из э. д. с. нормального элемента, известной с точностью до пятого—шестого знака, и из значения сопротивлений, которые также могут быть установлены с погрешностью не ниже тысячных долей процента.

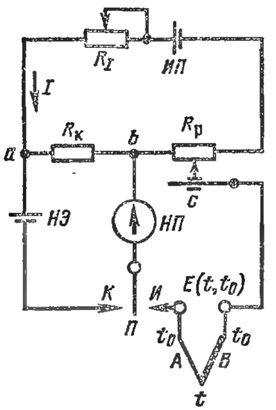


Рис. 4-16-1. Упрощенная принципиальная схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока.

Рассмотрим упрощенную принципиальную схему потенциометра с постоянной силой рабочего тока, показанную на рис. 4-16-1. В компенсационную цепь этой схемы включены: R_I — регулируемый резистор; *ИП* — источник питания; $R_р$ — реохорд, вдоль которого перемещается скользящий контакт — движок *c*; $R_к$ — контрольный резистор, предназначенный для установки рабочего тока *I*.

С помощью переключателя *П* можно нулевой прибор *НП* включать в цепь *НЭ* с э. д. с. $E_{НЭ}$ или в цепь термоэлектрического термометра *AB*. В реальных схемах потенциометров для предохранения *НЭ* от возможной перегрузки его током включают последовательно с ним балластное сопротивление (на рис. 4-16-1 не показано).

Для установления определенного значения рабочего тока *I* переключатель *П* устанавливают в положение *К*. При этом *НЭ* вместе с последовательно включенным нулевым прибором оказывается присоединенным к зажимам *a* и *b* контрольного резистора $R_к$. Ток в компенсационной цепи регулируется резистором R_I до тех пор, пока падение напряжения на $R_к$ не будет равно э. д. с. $E_{НЭ}$. При

выполнении этого условия указатель (стрелка или световой луч) нулевого прибора устанавливается на нулевой отметке шкалы, и имеет место равенство

$$E_{\text{НЭ}} = IR_{\text{к}}, \tag{4-16-1}$$

откуда

$$I = \frac{E_{\text{НЭ}}}{R_{\text{к}}}. \tag{4-16-2}$$

После установки рабочего тока I переключатель $П$ возвращают в среднее положение, а движок c устанавливают в положение, примерно соответствующее значению измеряемой термо-э. д. с. Затем переключатель $П$ устанавливают в положение $И$ и, наблюдая за отклонением указателя нулевого прибора, перемещают движок c до тех пор, пока указатель нулевого прибора не возвратится на нулевую отметку шкалы, т. е. пока компенсирующее напряжение на участке реохорда $R_{\text{р}}$ между точками b и c не будет равно измеряемой термо-э. д. с. термометра:

$$E(t,\ t_0) = ImR_{\text{р}}. \tag{4-16-3}$$

Учитывая формулу (4-16-2), получаем:

$$E(t,\ t_0) = \frac{E_{\text{НЭ}}}{R_{\text{к}}} mR_{\text{р}}, \tag{4-16-4}$$

где $m = R'_{\text{р}}/R_{\text{р}}$ ($R'_{\text{р}}$ — часть сопротивления реохорда левее движка c).

Уравнение (4-16-4) справедливо лишь при условии постоянства сопротивления компенсационной цепи и значения рабочего тока I в продолжение всего времени измерения. Несоблюдение этого условия приведет к неправильным результатам измерения термо-э. д. с. Поэтому при измерении необходимо периодически контролировать значение рабочего тока.

При измерении термо-э. д. с. с помощью потенциометра отсчет производят в тот момент, когда нулевой прибор показывает отсутствие тока в цепи термометра. Поэтому при измерении термо-э. д. с. компенсационным методом в цепи термоэлектрического термометра нет падения напряжения, а следовательно, и искажения значения измеряемой термо-э. д. с. термометра, а показания потенциометра не зависят от изменения сопротивления соединительных проводов и термометра. Это является существенным преимуществом потенциометров по сравнению с милливольтметрами. Однако следует иметь в виду, что значительное увеличение сопротивления внешней цепи уменьшает точность уравновешивания, так как чувствительность нулевого прибора вследствие этого снижается.

Точность уравновешивания измеряемой термо-э. д. с. напряжением на компенсационном сопротивлении определяется чувствительностью нулевого прибора. Допустим, что измеряется термо-э. д. с. $E(t,\ t_0)$ термометра и применяется нулевой прибор с постоянной по напряжению C_U. Так как в момент равновесия указатель нулевого

прибора практически не отклоняется, и имеет место равенство (4-16-3), то, очевидно, $\Delta E = E(t, t_0) - I_m R_р \leqslant C_U$. В этом случае относительная погрешность в определении равенства $E(t, t_0) = I m R_р$ может составить

$$\delta = \frac{\Delta E}{E(t, t_0)} 100 \leqslant \frac{C_U}{E(t, t_0)} 100.$$

Точность отсчета компенсирующего напряжения, равного $ImR_р$, зависит от точности установки рабочего тока I и от точности отсчета компенсационного сопротивления $mR_р$.

Для установки рабочего тока в рассматриваемых потенциометрах используется НЭ, э. д. с. которого под влиянием температуры окружающего воздуха может изменяться (§ 4-15). Поэтому для точной установки одного и того же значения рабочего тока резистор $R_к$ в лабораторных потенциометрах делают состоящим из постоянной и переменной частей. Например, в потенциометре с рабочим током $I = 0{,}001$ А, кроме постоянного резистора $R'_к = 1018{,}50$ Ом, имеется переменный $R''_к$, выполненный в виде декады, состоящей из десяти резисторов по 0,02 Ом каждый (рис. 4-16-2). Значение сопротивления $R_к = R'_к + R''_к$ можно устанавливать в пределах от 1018,50 до 1019,70 Ом и при рабочем токе $I = 0{,}001$ А на резисторе $R_к$ можно получать напряжение, соответствующее э. д. с. нормального элемента от 1,01850 до 1,01870 В.

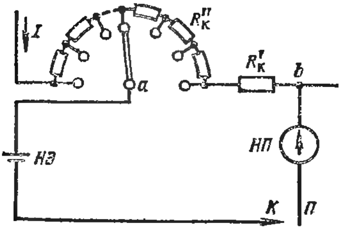


Рис. 4-16-2. Электрическая схема соединения контрольных резисторов потенциометра.

Следует также отметить, что точность измерения термо-э. д. с. в большой степени зависит от параметров схемы компенсационной цепи потенциометра и от точности выполнения сопротивления резисторов этой цепи. Для измерения термо-э. д. с. в лабораторных условиях в зависимости от предъявляемой точности к измерениям должны применяться низкоомные потенциометры классов точности 0,005; 0,015; 0,02 или 0,05 по ГОСТ 9245-68.

Переносный потенциометр типа ПП-63. Потенциометр ПП-63 имеет класс точности 0,05 и рассчитан на диапазоны измерений 0—25, 0—50 и 0—100 мВ. Потенциометр имеет встроенный источник регулируемого напряжения (пределы регулирования —1,25—0—25; —2,5—0—50 и —5—0—100 мВ при напряжении питания от 1,2 до 1,65 В и внешней нагрузке $R_в \geqslant 25$ Ом). Наименьшая ступень регулирования напряжения не превышает 0,03% предельного значения напряжения. Внутреннее сопротивление источника 10—15 Ом.

Наличие в потенциометре ПП-63 источника регулируемого напряжения позволяет использовать его как образцовый прибор для поверки милливольтметров и автоматических потенциометров, а также для измерения термо-э. д. с. или напряжения. Потенциометр снабжен проволочными резисторами ($R_3 = 0{,}6$ Ом; $R_4 = 1{,}6$ Ом; $R_5 = 5$ Ом; $R_6 = 15$ Ом; $R_7 = 16{,}2$ Ом; $R_8 = 25$ Ом), которые служат для имитирования внешнего сопротивления $R_{вн}$ при поверке

милливольтметров с температурной шкалой[1]. Погрешность резисторов не превышает ±0,1 Ом.

Принципиальная электрическая схема переносного потенциометра типа ПП-63 показана на рис. 4-16-3. Тумблер B_3 служит для включения питания компенсационной измерительной схемы потенциометра; резисторы R_{15} и R_{16} служат соответственно для грубой и точной регулировки рабочего тока I ($I = 0{,}002$ А) потенциометра. Штепсельный переключатель пределов измерений B_8 имеет три положения: «×2» — для измерения термо-э. д. с. или напряжения до 100 мВ; «×1» — до 50 мВ; «×0,5» — до 25 мВ.

Компенсационная цепь потенциометра состоит из реохорда R_{50} с шунтом R_{51} (приведенное сопротивление реохорда $R_р$ 2 Ом) и секционированной части $R_с$ из 24 манганиновых резисторов R_{26} — R_{49} по 2 Ом.

При установке штепселя переключателя диапазонов B_8 в положение «×2» (рабочий ток $I = 0\,002$ А) на $R_с$ устанавливается диапазон измерения от 0 до 96 мВ ступенями через 4 мВ, а на $R_р$ — от 0 до 4 мВ. Цена наименьшего деления шкалы реохорда в положении «×2» $10 \cdot 10^{-5}$ В.

При использовании потенциометра на диапазоне измерения от 0 до 50 мВ (переключатель диапазонов в положении «×1») $R_с$, $R_р$ и добавочный резистор R_{52} шунтируются резистором R_{25}, а в цепь источника питания включается балластный резистор R_{22}, чтобы значение рабочего тока I в цепи батареи оставалось неизменным и равным 0,002 А. В этом случае ток I', протекающий через $R_с$ и $R_р$, равен 0,001 А ($I' = I - I_1$), а на секционированном резисторе $R_с$ устанавливается диапазон измерения от 0 до 48 мВ ступенями через 2 мВ на $R_р$ — от 0 до 2 мВ. Цена наименьшего деления шкалы реохорда для этого предела $5 \cdot 10^{-5}$ В.

При установке штепселя переключателя диапазонов B_3 в положение «×0,5» резисторы $R_с$, $R_р$ и R_{52} шунтируются резистором R_{24}, а в цепь источника питания включается балластный резистор R_{23}, чтобы значение рабочего тока I в цепи батареи оставалось неизменным и равным 0,002 А. При этом ток I'', протекающий через $R_с$ и $R_р$, равен 0,0005 А ($I'' = I - I_2$), а на $R_с$ устанавливается диапазон измерения от 0 до 24 мВ ступенями через 1 мВ и на $R_р$ — от 0 до 1 мВ. Цена наименьшего деления реохорда для этого диапазона $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ В.

В целях унификации шкала секционированного резистора $R_с$ выполнена от 0 до 48 мВ ступенями через 2 мВ, а шкала приведенного сопротивления реохорда $R_р$ — от 0 до 2 мВ. Значения измеренной термо-э. д. с. или напряжения в милливольтах будут равны произведению суммы показаний по шкалам секционированного резистора и реохорда на соответствующий множитель диапазонов измерений («×0,5»; «×1» или «×2»).

Установка рабочего тока потенциометра производится по $E_{НЭ}$ НЭ класса 0,02, сравниваемой с падением напряжения на контрольном резисторе, состоящем из постоянной R_{17} и переменной R_{18} — R_{21} частей. Постоянная часть имеет значение 509,3 Ом. Переменная часть состоит из четырех резисторов по 0,1 Ом, пяти токовыводов с обозначениями *86*, *88*, *90*, *92* и *94* и центрального токовывода с перемычкой *П*, которая устанавливается на один из пяти указанных токовыводов в зависимости от значения э. д. с. применяемого ненасыщенного НЭ.

Тумблер B_1 имеет два положения: *К* — установка (контроль) значения рабочего тока I; *И* — измерение термо-э. д. с. или напряжения.

В качестве нулевого прибора *Г* в потенциометре используется гальванометр типа М274/1 (постоянная по току не более $4{,}5 \cdot 10^{-7}$ А/дел; внутреннее сопротивление не более 18 Ом; внешнее критическое сопротивление не более 250 Ом). Для включения гальванометра в цепь НЭ (тумблер B_1 в положении *К*) или в измерительную цепь (тумблер B_1 в положении *И*) служат кнопки $КН_1$ (грубо) и $КН_2$ (точно). Шунт R_1 служит для достижения необходимой степени успокоения гальванометра. В начальный момент при установке рабочего тока или при измерении пользуются для включения гальванометра в схему кнопкой $КН_1$, включающей последовательно с гальванометром защитный резистор $R_2 = 3{,}9$ кОм.

Тумблер B_2 имеет два положения «+» и «—», служит для изменения полярности компенсационного напряжения потенциометра.

---

[1] Для милливольтметров грПП и ПР 30/6 при поверке их во внешнее сопротивление $R_{вн}$ вводится дополнительное сопротивление 1,2 Ом.

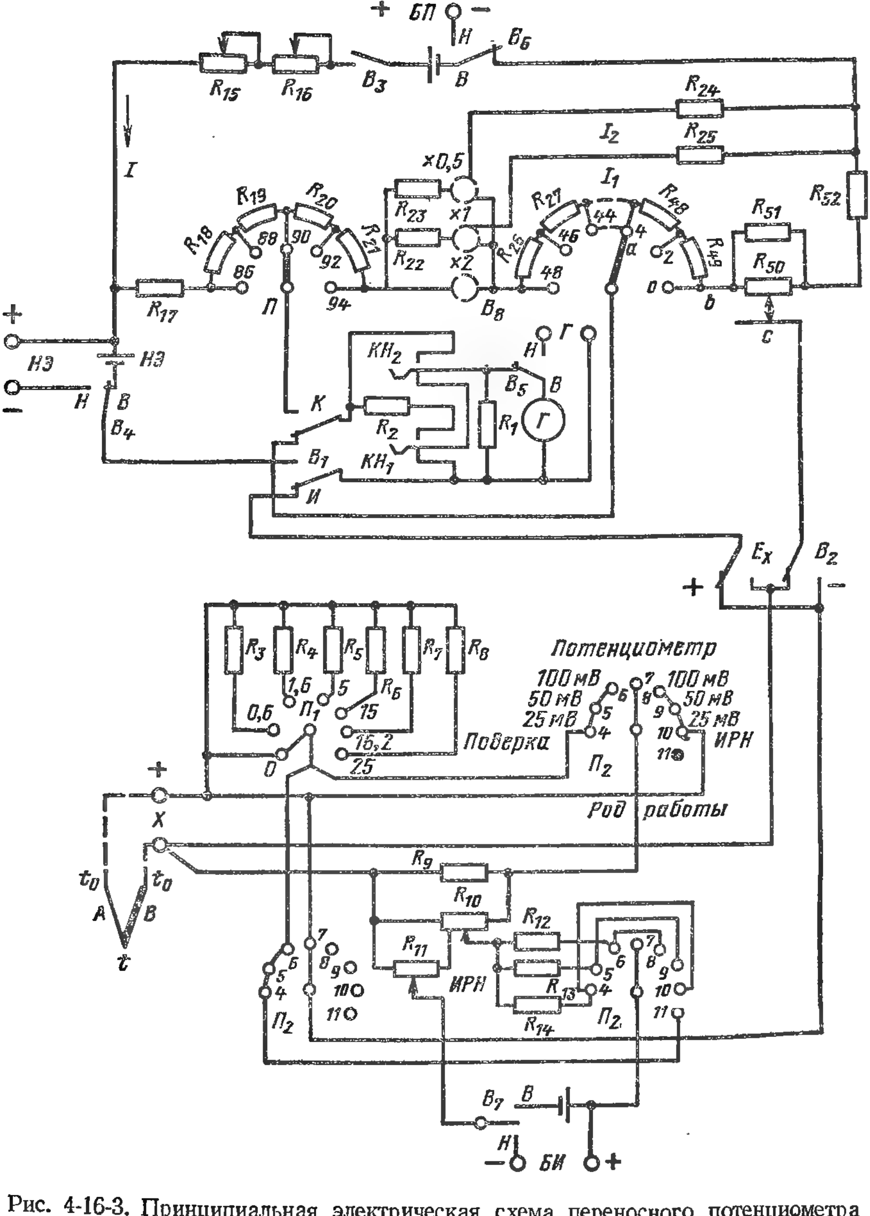


Рис. 4-16-3. Принципиальная электрическая схема переносного потенциометра типа ПП-63.

Источник регулируемого напряжения ИРН потенциометра содержит резисторы R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13} и R_{14}. Грубая регулировка производится резистором R_{10}, точная — R_{11}. Для уменьшения выходного сопротивления ИРН, а вместе с тем и влияния нагрузки на пределы регулировки напряжения на выходе ИРН установлен шунт R_9.

Трехплатный переключатель $П_2$ («род работы») имеет семь рабочих положений: *4* (25 мВ), *5* (50 мВ) и *6* (100 мВ) для поверки милливольтметров со шкалой в градусах Цельсия (переключатель $П_1$ занимает одно из положений; 0,6; 1,6; 5; 15; 16,2 или 25 Ом) и для проверки милливольтметров со шкалой в милливольтах или автоматических потенциометров (переключатель $П_1$ в положении «0») на верхние пределы регулируемого напряжения ИРН соответственно до 25, 50 или 100 мВ; *7* (потенциометр) для измерения термо-э. д. с. термометров или напряжения (переключатель $П_1$ в положении «0»); *8* (100 мВ), *9* (50 мВ) и *10* (25 мВ) — используется только ИРН на верхние пределы регулируемого напряжения соответственно до 100, 50 и 25 мВ. При измерении термо-э. д. с. термометра, поверке милливольтметра или автоматического потенциометра их присоединяют, соблюдая полярность, к зажимам X. Переключатель $П_2$ (род работы) может быть также установлен на контакт *11* (на панели обозначен точкой). В этом положении $П_2$ производят поверку сопротивлений катушек R_3 — R_8. Измерение сопротивления катушек производится мостом на зажимах «$+X$» и «$+БИ$».

Тумблеры B_4, B_5, B_6 и B_7 должны находиться в положении «$В$» при использовании внутренних и — «$Н$» при использовании наружных гальванометра, НЭ класса 0,02 и источников питания $БП$ и $БИ$, состоящих из трех параллельно включенных гальванических элементов типа «Марс». Такая батарея имеет э. д. с. 1,2—1,65 В.

Работу на потенциометре начинают с установления рабочего тока в его компенсационной цепи, предварительно включив питание и установив стрелку гальванометра на нулевую отметку шкалы с помощью корректора. Далее тумблер B_1 ставят в положение $К$ и, нажимая кнопку $КН_1$, замыкают цепь НЭ. Если стрелка гальванометра отклоняется от нулевой отметки шкалы вправо или влево, то, вращая рукоятки резисторов R_{15} и R_{16}, изменяют их сопротивление до тех пор, пока стрелка гальванометра не встанет против нулевой отметки. После этого производят окончательную подгонку рабочего тока, нажимая кнопку $КН_2$ и регулируя рабочий ток в компенсационной цепи только с помощью резистора R_{16}.

Признаком установления определенного значения рабочего тока I является отсутствие тока в цепи гальванометра в пределах определенной точности.

После установки рабочего тока тумблер B_1 ставят в положение $И$, а рукоятки реохорда $R_р$ и секционированного резистора $R_с$ в положение, близкое значению измеряемой термо-э. д. с. или напряжения. Затем, нажимая кнопки $КН_1$ и $КН_2$ (порядок включения кнопок такой же, как и при установке рабочего тока) и наблюдая за отклонением стрелки гальванометра, вращают рукоятку реохорда $R_р$ до тех пор, пока стрелка гальванометра не возвратится на нулевую отметку шкалы, т. е. пока компенсирующее напряжение на участке *ac* секционированного резистора и реохорда не будет равно измеряемой термо-э. д. с. $E(t, t_0)$ или измеряемому напряжению:

$$E(t, t_0) = U_{ab} + U_{bc} = U_{ac}, \tag{4-16-5}$$

где U_{ab}, U_{bc}, U_{ac} — напряжения на участках *ab*, *bc* и *ac*.

Пределы допускаемой основной погрешности потенциометра Δ при температуре окружающего воздуха от 15 до 30°С не превышают

$$\Delta = \pm (5 \cdot 10^{-4} U + 0{,}5 U_{мин}), \tag{4-16-6}$$

где U — данное показание потенциометра, В; $U_{мин}$ — цена наименьшего деления шкалы реохорда, В.

Общий вид панели потенциометра типа ПП-63 схематично показан на рис. 4-16-4. На этой панели показано расположение зажимов, тумблеров, переключателей, рукояток источника регулируемого напряжения $ИРН$, гальванометра, двух кнопок $КН_1$ (грубо) и $КН_2$ (точно), рукоятки реостатов R_{15} и R_{16} (рабочий

ток), рукояток секционированного резистора R_c и реохорда R_p. Для регулировки рабочего тока имеются две рукоятки, меньшая из них служит для грубой регулировки, а большая для точной регулировки. Двумя такими же рукоятками снабжен *ИРН* (напряжение).

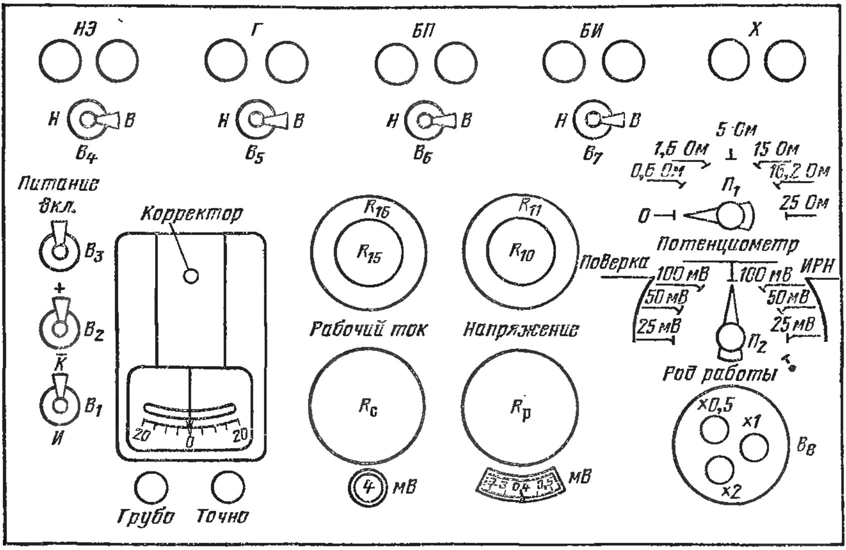


Рис. 4-16-4. Общий вид панели переносного потенциометра типа ПП-63.

При поверке потенциометра ПП-63 необходимо поверять также НЭ и устанавливать перемычку *П* переменной части контрольного резистора в положение, соответствующее действительному значению э. д. с. нормального элемента класса 0,02. При значениях э. д. с. НЭ 1,0186—1,0187; 1,0187—1,0189; 1,0189—1,0191; 1,0191—1,0193 и 1,0193—1,0194 В перемычка должна быть установлена на токовывод, обозначенный соответственно *86*, *88*, *90*, *92* и *94*.

4-17. Общие сведения об автоматических потенциометрах

Автоматические потенциометры широко применяются в различных отраслях промышленности для измерения и записи температуры в комплекте с термоэлектрическими термометрами, а также с телескопами (первичными преобразователями) пирометров полного излучения (гл. 7). Они одновременно могут быть использованы для измерения, записи и сигнализации или регулирования температуры. В этом случае потенциометры снабжаются дополнительным устройством для сигнализации или регулирования температуры. Некоторые модификации одноточечных потенциометров выпускаются с передающими преобразователями для дистанционной передачи измерительной информации (гл. 8). Автоматические потенциометры находят также широкое применение и для измерения других величин (давления, расхода, уровня и т. д.), изменение которых может быть преобразовано в изменение напряжения постоянного тока.

Отличительной особенностью устройства автоматических потенциометров от рассмотренных выше переносных и лабораторных является то, что регулирование компенсирующего напряжения, а следовательно, и уравновешивание измеряемой термо-э. д. с. термометра или напряжения, осуществляемое перемещением движка по калиброванному реохорду, производится не вручную, а автоматически с помощью непрерывно действующего следящего устройства.

Схема автоматического потенциометра со следящей системой, работающей непрерывно, показана на рис. 4-17-1. В потенциометрах этого типа при равенстве компенсирующего напряжения $U_{к. н}$ и измеряемой термо-э. д. с. $E\ (t,\ t_0)$ термометра исполнительный механизм следящей системы прибора находится в покое. Если измеряемая термо-э. д. с. $E\ (t,\ t_0)$ не равна компенсирующему напряжению $U_{к. н}$, то сигнал небаланса ΔU (нескомпенсированное напряжение постоянного тока) подается на вход преобразовательного каскада *ВУ* (входного устройства усилителя). Сигнал небаланса преобразуется во входном устройстве в электрический сигнал переменного тока и усиливается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя *РД*, выходной вал которого будет вращаться в направлении, зависящем от полярности сигнала. Выходной вал реверсивного двигателя через систему кинематической передачи воздействует на движок реохорда измерительной схемы *ИС*, изменяя компенсирующее напряжение $U_{к. н}$ до тех пор, пока оно не уравновесит измеряемую термо-э. д. с. $E\ (t,\ t_0)$. Одновременно приводится в движение каретка с указателем и пером *Кр* (или печатающим устройством в многоточечных приборах), фиксируя значение измеряемой температуры (термо-э. д. с.). Любые последующие изменения измеряемой термо-э. д. с. снова приводят в действие реверсивный двигатель, который с помощью движка реохорда измерительной схемы изменяет компенсирующее напряжение до значения, равного новому значению измеряемой термо-э. д. с., и приводит в движение каретку с указателем и пером, фиксируя новое значение измеряемой температуры.

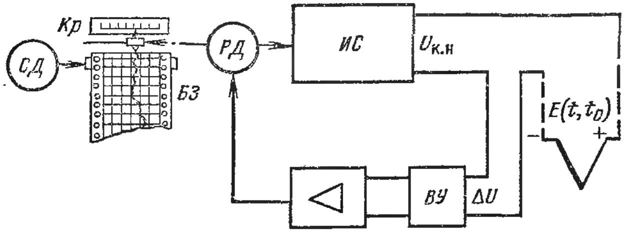


Рис. 4-17-1. Схема автоматического потенциометра со следящей системой.

Таким образом, в автоматических потенциометрах усилитель выполняет функции нуль-органа и осуществляет одновременно уси-

ление по напряжению и мощности сигнала разбаланса, поступающего от измерительной схемы, до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя, являющегося исполнительным механизмом следящей системы прибора.

Привод механизма продвижения диаграммной бумаги блока записи *БЗ* осуществляется синхронным двигателем *СД*, а в многоточечных приборах этот двигатель приводит в действие, кроме того, печатающее устройство каретки и двухполюсный переключатель термоэлектрических термометров.

Следящая система прибора, работающая непрерывно, используется также в безреохордных автоматических потенциометрах (§ 4-23).

Рассматриваемые ниже автоматические потенциометры являются техническими общепромышленными приборами высокого класса точности. Они бывают показывающие, показывающие и самопишущие с записью на дисковой и ленточной диаграмме. Приборы с дисковой диаграммной бумагой служат для измерения и записи температуры в одной точке. Потенциометры с ленточной диаграммой изготовляются как одноточечные, так и многоточечные для измерения и записи температуры в нескольких (2, 3, 6 и 12) точках.

Приборы самопишущие одноточечные снабжаются пером или другим устройством, которое записывает непрерывной линией на движущейся диаграммной бумаге значение измеряемой температуры.

Многоточечные самопишущие приборы снабжаются кареткой с печатающим механизмом для многоцветной или одноцветной записи и двухполюсным переключателем, автоматически подключающим к измерительной схеме поочередно все присоединенные к прибору термоэлектрические термометры. После наступления компенсации печатающий механизм каретки отпечатывает точку с цифрой, обозначающей номер термометра, термо-э. д. с. которого в данный момент измеряется. Переключатель автоматически присоединяет к измерительной схеме прибора следующий термометр. Таким образом, запись измеряемой температуры осуществляется последовательностью точек с цифрами, которая при правильном выборе длительности цикла (времени между двумя последовательными отпечатками) и скорости движения диаграммы однозначно определяет непрерывную зависимость измеряемой температуры от времени.

Автоматические потенциометры в зависимости от их назначения выпускаются с градуировкой шкалы в градусах Цельсия и в единицах напряжения, обычно в милливольтах. При применении потенциометров с температурной шкалой необходимо иметь в виду, что их шкала действительна только для указанного на циферблате обозначения градуировки, а следовательно, и для определенного термоэлектрического термометра.

Для автоматических электронных потенциометров, выпускаемых отечественной приборостроительной промышленностью, установ-

лены классы точности 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 (ГОСТ 7164-71) [1]. Многопредельные потенциометры могут иметь различный класс точности для каждого из пределов измерений.

Пределы допускаемой основной погрешности показаний потенциометров, выраженные в процентах нормирующего значения измеряемой величины, на всех отметках шкалы не должны превышать: ±0,25; ±0,5; ±1,0; ±1,5 — для классов точности 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 (соответственно).

Пределы допускаемой основной погрешности на всех отметках диаграммы самопишущих потенциометров устанавливаются в зависимости от класса точности и ширины поля записи при относительной влажности 60% [2]. Например, для автоматических потенциометров классов точности 0,25 и 0,5 с шириной поля записи 250 мм пределы допускаемой основной погрешности на всех отметках диаграммы не должны превышать ±0,5%, а для приборов класса точности 0,5 с шириной поля записи 160 мм — ±1,0% нормирующего значения измеряемой величины.

Вариация показаний потенциометров не должна превышать 0,2% нормирующего значения для приборов класса точности 0,25 и половины абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности — для приборов остальных классов.

Для потенциометров нормирующее значение измеряемой величины и диапазон измерения выражаются в единицах напряжения.

Автоматические потенциометры предназначаются для работы в стационарных условиях при температуре окружающего воздуха от 5 до 50°С и относительной влажности от 30 до 80%.

Изменение показаний потенциометров с диапазоном измерений 10 мВ и более, имеющих компенсацию температуры свободных концов термоэлектрического термометра, вызванное изменением температуры окружающего воздуха от 20 ± 5°С до любой температуры в интервале от 5 до 50°С на каждые 10°С, не должно превышать 0,2% для приборов классов точности 0,25 и 0,5; 0,25% — для приборов классов 1,0 и 1,5; 0,25% (длина шкалы 250 мм) и 0,4% (длина шкалы 160 мм) для потенциометров с диапазоном измерений менее 10 мВ.

Для потенциометров без компенсации температуры свободных концов термоэлектрического термометра изменение показаний на каждые 10°С не должно превышать 0,1% для приборов класса 0,25 и 0,5 и 0,15% для приборов классов 1,0 и 1,5.

Питание силовой электрической цепи потенциометров осуществляется от сети переменного тока напряжением 220^{+22}_{-33} В, частотой 50 ± 1 Гц. При изменении напряжения питания силовой электрической цепи приборов на +10 и —15% номинального значения изменение показаний потенциометров не должно превышать 0,2% для приборов класса точности 0,25 и половины абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности для потенциометров остальных классов точности.

Питание измерительной схемы потенциометров осуществляется от источника стабилизированного питания, встроенного в прибор.

Погрешность скорости перемещения диаграммных лент и дисков автоматических потенциометров не должна превышать ±0,5% заданной скорости при напряжении сети 220^{+22}_{-33} В и частоте 50 Гц. Номинальная скорость перемещения диаграммной ленты выпускаемых самопишущих потенциометров лежит в пределах от 20 до 54 000 мм/ч. У серийно выпускаемых приборов с дисковой диаграммой скорость вращения диаграммных дисков равна обычно одному обороту за 24 ч, но может быть и другой.

---

[1] Потенциометры класса точности 1,5 в настоящее время не выпускаются.

[2] При относительной влажности, отличной от 60%, погрешность записи прибора будет увеличиваться, например, для потенциометров с шириной поля записи 250 мм погрешность записи увеличивается на 0,07% на каждые 10% относительной влажности.

Время прохождения указателем всей шкалы серийно выпускаемых потенциометров в зависимости от типа и модификации выбирается из ряда 0,25; 0,50; 1,0; 2,5; 5,0; 10 и 16 с.

Изменение показаний потенциометров с диапазоном измерения 10 мВ и более, вызванное влиянием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м, образованиого переменным током частотой 50 Гц, при самых неблагоприятных фазе и направлении поля не должно превышать ±0,5% диапазона измерений.

Изменение показаний потенциометров, вызванное влиянием паразитного сигнала между входными измерительными зажимами, действующего последовательно с полезным сигналом (поперечная помеха, § 4-18), на 20% диапазона измерения приборов и имеющего любой фазовый угол, не должно превышать предела допускаемой основной погрешности потенциометров. Вариация показаний приборов при этом не должна превышать абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности.

Изменение показаний приборов, вызванное влиянием паразитного напряжения постоянного тока и переменного тока с любым фазовым углом между любым измерительным зажимом и заземленным корпусом (продольная помеха, § 4-18) на всем диапазоне измерения приборов, не должно превышать 0,5 предела допускаемой основной погрешности потенциометров. Вариация показаний приборов в этом случае не должна превышать абсолютное значение предела допускаемой основной погрешности.

При определении погрешности измерения температуры автоматическим потенциометром в комплекте с термоэлектрическим термометром необходимо иметь в виду, что предел допускаемой основной погрешности и изменение показаний потенциометра под действием влияющих величин в пределах нормированной области их значений выражаются как приведенные погрешности в процентах нормирующего значения измеряемой величины (§ 1-5), а допускаемая градуировочная погрешность термоэлектрического термометра и термоэлектродных проводов нормируется в виде абсолютиой погрешности, выражаемой в милливольтах (табл. 4-7-3 и 4-9-1).

П р и м е р. Определим предельную погрешность измерения температуры перегретого водяного пара автоматическим самопишущим потенциометром класса 0,5 со шкалой 200—600°С (градуировка ХА) в комплекте с термоэлектрическим термометром типа ТХА-284 в нормальных условиях и предельную погрешность измерения температуры пара в эксплуатационных условиях. Потенциометр показывает температуру пара $t = 565$°С.

Определение погрешности при измерении температуры пара в нормальных условиях. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности показаний и записи (скорость продвижения диаграммной ленты 20 мм/ч) потенциометром класса 0,5 (ширина поля записи 250 мм)

$$\Delta E_{\text{п}} = \pm \frac{\delta E_{\text{д}}}{100} = \pm \frac{0{,}5 \cdot 16{,}78}{100} = \pm\, 0{,}083 = \pm\, 0{,}08 \text{ мВ},$$

что соответствует (табл. П4-7-3) $\Delta t_{\text{п}} = \pm 2°$ С или

$$\delta_{\text{п}} = \pm \frac{\Delta t_{п}}{t} 100 = + \frac{2}{565} \cdot 100 = \pm\, 0{,}35\%.$$

Допускаемое отклонение (погрешность) градуировки термометра ТХА-284 согласно табл. 4-7-3

$$\Delta E_{\text{т}} = \pm\, [0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4}\,(t - 300)] =$$
$$= \pm\, [0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4}\,(565 - 300)] = \pm\, 0{,}21 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_{\text{т}} = \pm 5{,}3°$ С или

$$\delta_{\text{т}} = \pm \frac{\Delta t_{\text{т}}}{t} 100 = \pm \frac{5{,}3}{565} 100 = \pm\, 0{,}94\%.$$

Допускаемое отклонение э. д. с. в паре между жилами термоэлектродных проводов ХА согласно табл. 4-9-1

$$\Delta E_{\text{т. п}} = \pm\, 0{,}15 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_{т.п} = \pm 3{,}8°C$ или

$$\delta_{т.\,п} = \pm \frac{\Delta t_{т.\,п}}{t} 100 = \pm \frac{3{,}8}{565} 100 = \pm 0{,}67\%.$$

Предельная абсолютная погрешность показаний для комплекта определяется по формуле

$$\Delta E_{п.\,к} = \pm \sqrt{\Delta E_{п}^2 + \Delta E_{т}^2 + \Delta E_{т.\,п}^2} =$$
$$= \pm \sqrt{0{,}08^2 + 0{,}21^2 + 0{,}15^2} = \pm 0{,}27 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_{п.к} = \pm 6{,}8 \approx \pm 7°C$ или

$$\delta_{п.\,к} = \pm \frac{\Delta t_{п.\,к}}{t} 100 = \pm \frac{7}{565} 100 = \pm 1{,}2\%.$$

Предельная относительная погрешность записи среднесуточной температуры пара (ширина поля записи 250 мм) для комплекта определяется по формуле

$$\delta_{з.\,п} = \pm \sqrt{\delta_{п}^2 + \delta_{т}^2 + \delta_{т.\,п}^2 + \delta_{пл}^2}, \qquad (4\text{-}17\text{-}1)$$

где $\delta_{пл}$ — погрешность определения среднесуточного значения температуры пара по диаграммной ленте; принимается равной допускаемой относительной погрешности планиметра, % (погрешность планиметра зависит от его конструкции).

Принимая для полярного планиметра $\delta_{пл} = \pm 0{,}5\%$, определим по формуле (4-17-1) предельную погрешность записи температуры пара для комплекта

$$\delta_{з.\,к} = \pm \sqrt{0{,}35^2 + 0{,}94^2 + 0{,}67^2 + 0{,}5^2} = \pm 1{,}3\%,$$

что соответствует $\Delta t_{з.к} = \pm 565 \cdot 0{,}013 = \pm 7{,}3°C$.

При определении приближенного значения предельной погрешности записи среднесуточной температуры пара погрешностью скорости перемещения диаграммной ленты можно пренебречь.

Если самопишущий потенциометр класса 0,5 имеет ширину поля записи 160 мм, то пределы допускаемой основной абсолютной погрешности записи его равны:

$$\Delta E_{п} = \pm \frac{\delta E_{д}}{100} = \pm \frac{1 \cdot 16{,}78}{100} = \pm 0{,}17 \text{ мВ},$$

что составляет согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_{п} = \pm 4{,}2 \approx \pm 4°C$ или

$$\delta_{п} = \pm \frac{\Delta t_{п}}{t} \cdot 100 = \pm \frac{4}{565} 100 = \pm 0{,}7\%.$$

Погрешности $\delta_{т}$, $\delta_{т.п}$ и $\delta_{пл}$ в данном случае сохраняют прежние значения.

В этом случае предельная относительная погрешность записи среднесуточной температуры пара (ширина поля записи 160 мм) для комплекта

$$\delta_{з.\,к} = \pm \sqrt{\delta_{п}^2 + \delta_{т}^2 + \delta_{т.\,п}^2 + \delta_{пл}^2} =$$
$$= \pm \sqrt{0{,}7^2 + 0{,}94^2 + 0{,}67^2 + 0{,}5^2} = \pm 1{,}4\%,$$

что соответствует $\Delta t_{з.к} = \pm 8°C$.

Применяемая в этом примере методика оценки предельной погрешности показаний и записи температуры автоматическим потенциометром в комплекте с термоэлектрическим термометром согласуется с опытными данными. Погрешность показаний и записи температуры для комплекта по опытным данным получается по сравнению с расчетными значениями меньше на 10—15%.

Определение погрешности при измерении температуры пара в эксплуатационных условиях. Вначале выясним причины, которые могут вызывать изменение погрешности измерения температуры пара в эксплуатационных условиях по сравнению с нормальными.

При измерении температуры среды необходимо учитывать, что температура рабочего конца термометра может отличаться от действительной температуры среды. При измерении стационарной температуры перегретого водяного пара причинами этого являются теплообмен излучением между термометром и окружающей его внутренней стенкой паропровода и отвод тепла по термометру вследствие теплопроводности (см. § 6-2, 6-4).

Систематические погрешности, происходящие вследствие теплообмена излучением и теплопроводности, относятся к методическим погрешностям. Как показывают проведенные исследования, при соблюдении ряда условий методическими погрешностями при измерении температуры пара на ТЭС можно пренебречь.

Изменение показаний потенциометра при отсутствии методических погрешностей и правильной его установке может быть вызвано действием влияющих величин (см. § 1-5).

Согласно техническим характеристикам автоматических потенциометров изменение показаний прибора, применяемого для измерения температуры пара в комплекте с термоэлектрическим термометром ТХА-284, может происходить:

1) за счет изменения температуры окружающего воздуха от 20 ± 5°С. Если это изменение не выходит из пределов расширенной области от 5 до 50°С, изменение показаний прибора на каждые 10°С не будет превышать

$$\Delta e_1 = \pm \frac{0{,}2 \cdot 16{,}78}{100} = \pm 0{,}034 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_1 = \pm 0{,}8$°С или

$$\delta_1 = \pm \frac{\Delta t_1}{t} 100 = \pm \frac{0{,}8}{565} 100 = \pm 0{,}14\%.$$

Если температура окружающего воздуха в помещении, где установлен потенциометр, равна 45°С, то изменение показаний прибора не превышает

$$\Delta e_1 = \pm \frac{0{,}4 \cdot 16{,}78}{100} = \pm 0{,}067 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_1 = \pm 1{,}7$°С или

$$\delta_1 = \pm \frac{\Delta t_1}{t} 100 = \pm \frac{1{,}7}{565} 100 = \pm 0{,}30\%;$$

2) за счет изменения напряжения питания силовой электрической цепи прибора. Если это изменение находится в пределах +10 и —15% номинального значения, изменения показаний потенциометра не превышают

$$\Delta e_2 = \pm \frac{0{,}25 \cdot 16{,}78}{100} = \pm 0{,}042 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_2 = 1{,}05 \approx 1$°С или

$$\delta_2 = \pm \frac{\Delta t_2}{t} 100 = \pm \frac{1}{565} 100 = \pm 0{,}18\%;$$

3) за счет влияния внешнего магнитного поля. Если напряженность внешнего магнитного поля, образованного переменным током частотой 50 Гц, не более 400 А/м, изменение показаний прибора не будет превышать

$$\Delta e_3 = \pm \frac{0{,}5 \cdot 16{,}78}{100} = \pm 0{,}08 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_3 = \pm 2$°С или

$$\delta_3 = \pm \frac{\Delta t_3}{t} 100 = \pm \frac{2}{565} 100 = \pm 0{,}35\%;$$

4) за счет влияния поперечной помехи не более 20% диапазона измерения изменение показаний прибора не будет превышать

$$\Delta e_4 = \pm \frac{0,5 \cdot 16,78}{100} = \pm 0,08 \text{ мВ},$$

что соответствует согласно табл. П4-7-3 $\Delta t_4 = \pm 2°C$ или

$$\delta_4 = \pm \frac{\Delta t_4}{t} 100 = \pm \frac{2}{565} 100 = \pm 0,35\%.$$

Приближенно предел суммарного изменения показаний потенциометра можно оценить по формуле

$$\delta_{д.\,с} = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \pm \sqrt{0,30^2 + 0,18^2 + 0,35^2 + 0,35^2} = \pm 0,60\%,$$

что соответствует $\Delta t_{д.с} = \pm 565 \cdot 0,006 = \pm 3,4°C$.

Предельная погрешность показания для комплекта при измерении температуры пара в эксплуатационных условиях не будет превышать

$$\Delta t_{п.\,э} = \pm (|\Delta t_{п.\,к}| + |\Delta t_{д.\,с}|) = \pm (7 + 3,4) = \pm 10,4°C$$

или

$$\delta_{п.\,э} = \pm \frac{\Delta t_{п.\,э}}{t} 100 = \pm \frac{10,4}{565} 100 = \pm 1,8\%.$$

Предельная относительная погрешность записи среднесуточной температуры пара для комплекта в эксплуатационных условиях (ширина поля записи 250 мм) не будет превышать

$$\delta_{з.\,к.\,э} = \pm (|\delta_{з.\,к}| + |\delta_{д.\,с}|) = \pm (1,3 + 0,6) = \pm 1,9\%,$$

что соответствует $\Delta t_{з.к.э} = 565 \cdot 0,019 = \pm 10,7°C$.

Если прибор класса 0,5 имеет диаграммную ленту шириной 160 мм, то предельная относительная погрешность записи средней суточной температуры пара в эксплуатационных условиях не будет превышать

$$\delta_{з.\,к.\,э} = \pm (|\delta_{з.\,к}| + |\delta_{д.\,с}|) = \pm (1,4 + 0,6) = \pm 2,0\%,$$

что соответствует $\Delta t_{з.к.э} = \pm 11,3°C$.

При определении приближенного значения предельной погрешности записи температуры пара в эксплуатационных условиях предполагалось, что значение относительной влажности равно 60%.

Предельная погрешность измерений температуры пара в эксплуатационных условиях автоматическим потенциометром в комплекте с термоэлектрическим термометром может быть уменьшена по сравнению с полученными значениями.

Если автоматический потенциометр установить на щите в специальном помещении, в котором температура воздуха поддерживается в пределах от 18 до 25°C и не будет выходить за пределы нормальной области значений 20±5°C, то $\Delta e_1 = 0$.

Изменение показаний потенциометра, вызываемое изменением напряжения питания силовой электрической цепи его, также можно исключить, если обеспечить стабилизацию напряжения.

Помещение для щита, на котором устанавливается потенциометр, необходимо выбирать в таком месте, где исключается возможность влияния на него внешнего магнитного поля. Как показывают исследования, проведенные на ТЭС В. П. Преображенским, М. А. Панько и А. Н. Забелиным, напряженность переменного магнитного поля в помещениях блочных щитов не превышает 0,4—1,5 А/м, а в местах расположения местных щитов турбогенераторов 0,6—5 А/м.

Для устранения или уменьшения поперечной помехи необходимо прокладывать термоэлектродные провода так, чтобы возможные наводки внешним электромагнитным полем были сведены к минимуму. Если учесть, что современные потенциометры для уменьшения влияния поперечной помехи снабжаются многозвенными фильтрами (§ 4-18), то этим влиянием на изменение показаний прибора также можно пренебречь.

4-18. Принципиальные схемы автоматических потенциометров

В автоматических потенциометрах используется компенсационная мостовая измерительная схема. Напряжение, компенсирующее измеряемую термо-э. д. с. термоэлектрического термометра, в этой схеме получается как разность потенциалов в двух точках. Потенциал одной из точек определяется положением движка реохорда, а потенциал другой зависит от температуры свободных концов термометра. Это дает возможность, как будет показано ниже, осу-

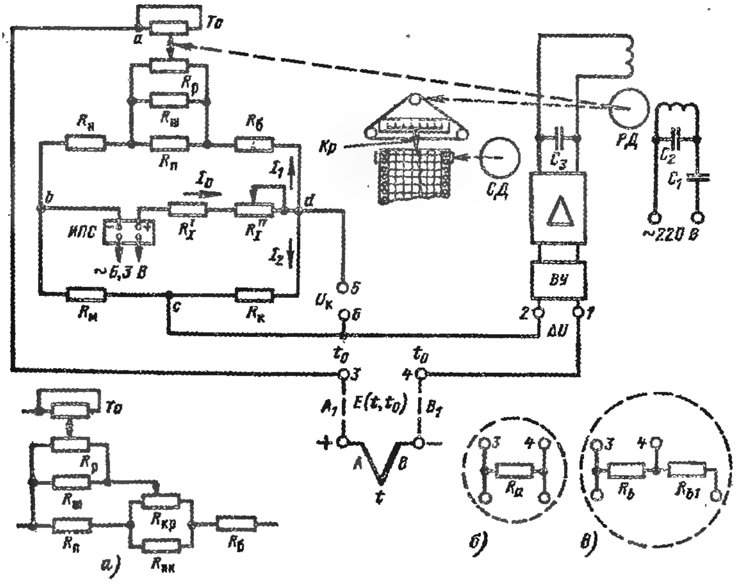


Рис. 4-18-1. Типовая принципиальная схема одноточечного автоматического потенциометра.

ществить автоматическое введение поправки на изменение термо-э. д. с. термометра, вызываемое отклонением температуры свободных концов его от 0°С. Измерительная схема позволяет также выполнять шкалы потенциометров односторонние, двусторонние и безнулевые (с подавлением нуля).

Ниже рассмотрим приведенную на рис. 4-18-1 типовую принципиальную схему одноточечного автоматического потенциометра. На этой схеме приняты следующие обозначения: $R_р$ — реохорд; $R_ш$ — шунт реохорда, служащий для подгонки сопротивления последнего до заданного нормированного значения $R_{н.\,р}$; *То* — токоотвод; $R_п$ — резистор для установления диапазона измерения $E_д = E(t_к, t_0) - E(t_н, t_0)$; $R_н$ — резистор для установления начального значения шкалы $E(t_н, t_о)$; $R_б$ — резистор балластный для установки при различных градуировках определенного значения сопро-

тивления верхней ветви измерительной схемы bad, а следовательно, и рабочего тока $I_1 = 3$ мА; $R_м$ — вспомогательный резистор из медной проволоки для автоматического введения поправки на изменение термо-э. д. с. термометра при изменениях температуры его свободных концов; $R_к$ — контрольный резистор, сопротивлением $509{,}5 \pm 0{,}2$ Ом (или $\pm 0{,}5$ Ом) для всех выпускаемых потенциометров, служащий для контроля рабочего тока в измерительной схеме $U_к = I_2 R_к$ ($I_2 = 2$ мА) при градуировке прибора или его поверке; *ИПС* — источник питания стабилизированный; R_I' и R_I'' — резисторы в цепи *ИПС* для ограничения и регулировки рабочего тока при градуировке или поверке прибора; *AB* — термоэлектрический термометр; A_1B_1 — термоэлектродные провода; *5—6* — зажимы, к которым при градуировке прибора или его поверке присоединяют нулевой прибор (например, гальванометр типа М195/1) и насыщенный нормальный элемент класса точности 0,005; *ВУ* — входное устройство усилителя, предназначенное для преобразования поступающего из измерительной схемы сигнала небаланса (нескомпенсированного напряжения) постоянного тока в сигнал (напряжение) переменного тока; *а* — движок; *Кр* — каретка с указателем и пером; *РД* — реверсивный асинхронный двигатель конденсаторного типа с короткозамкнутым ротором с встроенным в его корпус редуктором, передаточное число которого определяет время прохождения кареткой всей шкалы прибора; C_1 и C_2 — конденсаторы для создания необходимого фазового сдвига (90°) между магнитными потоками обмотки возбуждения и управляющей обмотки и необходимого напряжения (127 В) на обмотке возбуждения; C_3 — конденсатор, шунтирующий управляющую обмотку реверсивного двигателя для компенсации индуктивной составляющей тока в этой обмотке; *СД* — синхронный двигатель для продвижения диаграммной ленты, а в многоточечных приборах также для привода печатающего устройства и двухполюсного переключателя термоэлектрических термометров.

Все резисторы измерительной схемы автоматических потенциометров, кроме $R_м$, изготовляют из стабилизированной манганиновой проволоки. В потенциометрах, работающих в комплекте с термометрами градуировок *ПП*, *ХА*, *ХК* и др., резистор $R_м$ находится в непосредственной близости со свободными концами термоэлектродных проводов A_1B_1, соединяющих термометр *AB* с прибором.

При измерении температуры автоматическими потенциометрами в комплекте с термоэлектрическими термометрами градуировки ПР-30/6 поправка на изменение температуры свободных концов, как отмечалось выше, не вводится. Поэтому все резисторы измерительной схемы потенциометров, предназначенных для работы с этими термометрами, изготовляют из манганиновой проволоки.

Реохорд автоматического потенциометра является ответственным узлом. Основные элементы реохорда — рабочая спираль $R_р$ и токоотвод *То* (вспомогательная спираль). В потенциометрах типа КПП, КСП и др., выпускаемых в настоящее время, рабочую и вспомога-

тельную спирали изготовляют из проволоки ПдВ-20 (сплав палладий—вольфрам). В приборах прежних разработок типа ЭПП, ПС и других рабочая и токоотводящая спирали выполнялись из манганиновой проволоки. Реохорд из проволоки ПдВ-20 обладает большей стойкостью против истирания по сравнению с реохордом из манганиновой проволоки. Для повышения надежности работы движок реохорда снабжается контактами, выполненными из сплава золото—серебро—медь. Надежность контакта, а следовательно, и работы реохорда обеспечивается также чистотой контактных поверхностей, защитой от загрязнений и необходимым контактным давлением.

Как видно из рис. 4-18-1, термоэлектрический термометр AB подключен последовательно с усилителем к точкам a и c измерительной схемы потенциометра. К зажимам b и d подключен источник стабилизированного питания, обеспечивающий постоянство рабочего тока I_1 и I_2 ($I_0 = I_1 + I_2$) в измерительной схеме прибора. При нормальной температуре окружающего воздуха напряжение между точками a и c зависит только от положения движка реохорда, и для каждого значения измеряемой термо-э. д. с. термометра $E(t, t_0)$ можно найти такое положение движка реохорда, при котором компенсирующее напряжение U_{ac} между точками a и c равно $E(t, t_0)$ и тока в цепи термометра не будет. В этом случае по закону Кирхгофа для контура abc ($ВУ$) BAa

$$I_1 m R_{\text{пр}} + I_1 R_{\text{н}} - I_2 R_{\text{м}} - E(t, t_0) = 0,$$

откуда

$$E(t, t_0) = I_1 m R_{\text{пр}} + I_1 R_{\text{н}} - I_2 R_{\text{м}} = U_{ac}, \qquad (4\text{-}18\text{-}1)$$

где $R_{\text{пр}}$ — приведенное сопротивление реохорда; $m = R'_{\text{пр}}/R_{\text{пр}}$ (здесь $R'_{\text{пр}}$ — часть приведенного сопротивления реохорда левее движка a).

Рассмотрим принцип автоматического введения поправки на изменение температуры свободных концов термоэлектрического термометра. Допустим, что первоначальная температура свободных концов термометра t_0 увеличилась и стала равной t'_0, а температура рабочего конца осталась без изменения и равна t. В этом случае значение термо-э. д. с. термометра уменьшится на $E(t'_0, t_0)$. Если бы все сопротивления измерительной схемы оставались при этом неизменными, то движок реохорда сместился бы влево на расстояние, соответствующее значению $E(t'_0, t_0)$, и потенциометр при постоянной температуре t рабочего конца термометра показал неправильную (заниженную) температуру. В действительности с повышением температуры t_0 сопротивление медного резистора $R_{\text{м}}$, находящегося в одинаковых температурных условиях со свободными концами термометра, увеличивается на $\Delta R_{\text{м}}$. При этом несколько изменяются токи I_1 и I_2, а вместе с тем и уменьшается компенсирующее напряжение U_{ac} на ΔU_{ac}. В этом случае на основании уравнения (4-18-1)

$$E(t, t'_0) = E(t, t_0) - E(t'_0, t_0) = (I_1 + \Delta I_1) m R_{\text{пр}} + (I_1 + \Delta I_1) R_{\text{н}} -$$
$$- (I_2 - \Delta I_2) R_{\text{м}} - (I_2 - \Delta I_2) \Delta R_{\text{м}} = U_{ac} - \Delta U_{ac}. \qquad (4\text{-}18\text{-}2)$$

Таким образом, для того чтобы движок a сохранил свое прежнее положение и прибор показывал температуру рабочего конца термометра независимо от температуры его свободных концов (в определенных пределах 5—50°С), необходимо обеспечить равенство $E(t'_0, t_0) = \Delta U_{ac}$. Отсюда следует, что сопротивление резистора $R_м$ должно быть рассчитано таким образом, чтобы компенсирующее напряжение между точками a и c изменялось с допускаемой погрешностью на то же значение, на которое изменяется термо-э. д. с. термометра вследствие изменения температуры его свободных концов. В этом случае показания прибора останутся без изменения в пределах принятой погрешности. Ниже будет показано, что значение сопротивления резистора $R_м$ может быть принято с допускаемой погрешностью одинаковым для всех диапазонов измерений прибора с термоэлектрическими термометрами одной и той же градуировки.

Важной характеристикой компенсационной измерительной схемы потенциометра с усилителем в качестве нулевого индикатора является ее чувствительность по напряжению, которая определяется как отношение напряжения на входе усилителя к нескомпенсированному напряжению.

Нескомпенсированному напряжению $\Delta U = E(t, t_0) - U_{ac}$ соответствует ток, протекающий через входную цепь усилителя

$$I_у = \frac{\Delta U}{R_у + R_{сх} + R_{вн}},$$

где $R_у$ — входное сопротивление усилителя со стороны зажимов входного устройства $ВУ$; $R_{сх}$ — сопротивление измерительной схемы потенциометра; $R_{вн}$ — суммарное сопротивление термометра и термоэлектродных проводов.

Если напряжение на входе усилителя

$$U_у = I_у R_у,$$

то чувствительность по напряжению измерительной схемы прибора

$$S_U = \frac{U_у}{\Delta U} = \frac{R_у}{R_у + R_{сх} + R_{вн}}. \tag{4-18-3}$$

Порог чувствительности электронного потенциометра по напряжению $\Omega_{пU}$, т. е. наименьшее изменение значения измеряемой термо-э. д. с., способное вызвать малейшее изменение показания прибора, определяется выражением

$$\Omega_{пU} = \frac{\Omega_{уU}}{\xi S_U}; \tag{4-18-4}$$

здесь $\Omega_{уU}$ — порог чувствительности усилителя потенциометра (§ 4-20). Коэффициент ξ учитывает изменение коэффициента усиления усилителя при колебаниях напряжения, температуры и т. п. (обычно $\xi = 0{,}8$).

Порог чувствительности по напряжению электронных автоматических потенциометров обычно не превышает 1/5 предела допускаемой основной погрешности показания данного прибора.

Для обеспечения помехоустойчивости электронных автоматических потенциометров в зависимости от вида помехи применяют фильтры и специальную экранировку первичной и вторичной обмоток входного трансформатора (§ 4-20).

В практике эксплуатации автоматических потенциометров наиболее общим является случай, когда сигнал помехи действует последовательно с полезным сигналом во входной цепи прибора. Такой вид помехи обычно называют помехой нормального вида или поперечной помехой. Причинами появления в цепи термоэлектрического термометра, а вместе с тем и на входе потенциометра поперечной помехи могут быть наводки внешнего электромагнитного поля, паразитные токи и э. д. с. и прочее. Причинами появления электромагнитного поля могут быть излучения электромагнитной энергии силовыми кабелями, промышленными электрическими установками и т. п.

В ряде случаев приходится встречаться и с другим видом воздействия помех, который имеет место, когда потенциалы точек заземления корпуса прибора (или усилителя) и рабочего конца термометра различны. Этот вид помехи носит название помехи общего вида или продольной помехи. В тех случаях, когда входные или измерительные цепи потенциометра представляют собой электрическую цепь, несимметричную относительно корпуса, то продольная помеха превращается в поперечную. Продольная помеха может возникать также при наличии контуров заземления, через которые протекает ток большого значения, и между различными точками заземления появляется разность потенциалов или при измерении термоэлектрическим термометром температуры жидкого металла в электрических плавильных печах и в ряде других случаев. Методы уменьшения влияния помех при измерении температуры автоматическими потенциометрами в комплекте с термоэлектрическими термометрами рассмотрены в [12, 16].

Следует отметить, что чувствительность электронных автоматических потенциометров к продольной помехе значительно меньше, чем к поперечной. Это объясняется тем, что измерительные цепи потенциометра имеют сравнительно небольшое значение проводимости утечки, а также наличием гальванического разделения входных цепей и общей цепи усилителя, которая обычно соединена с корпусом. Необходимо также отметить, что при воздействии продольной помехи на потенциометр появляется, как правило, поперечная помеха такого же спектрального состава, что и продольная.

Действие помех на автоматический электронный потенциометр вызывает смещение нуля, уменьшение коэффициента усиления усилителя и вследствие этого увеличение статической и динамической погрешности прибора.

Для уменьшения влияния помех, возникающих в цепи термоэлектрического термометра, на вход прибора подключают многозвенные фильтры. Автоматические потенциометры типа КСП2 и КСП4 с временем прохождения кареткой (указателем) всей шкалы 2,5; 5 и 10 с снабжают двойным Г-образным фильтром (*Ф1*), состоящим из резисторов $R_{ф1}$, $R_{ф2}$, $R_{ф3}$ и конденсаторов $C_{ф1}$, $C_{ф2}$, $C_{ф3}$. Приборы типа КСП4 с временем прохождения указателем всей шкалы 1 с имеют на входе двойной Т-образный фильтр (*Ф2*), состоящий из резисторов $R_{ф4}$, $R_{ф5}$, $R_{ф6}$ и конденсаторов $C_{ф4}$, $C_{ф5}$, $C_{ф6}$ (рис. 4-22-5).

Измерительная схема потенциометров, работающих в комплекте с телескопами пирометров полного излучения, отличается от рассмотренной тем, что в цепь постоянного резистора $R_п$ и реохорда

включен корректирующий резистор $R_{кр}$, зашунтированный резистором $R_{пк}$ (рис. 4-18-1, *а*). При перемещении рукой движка корректирующего резистора меняется значение приведенного сопротивления реохорда, а следовательно, и компенсирующее напряжение U_{ac}. Корректирующий резистор позволяет значительно уменьшить методическую погрешность при измерении температуры пирометром полного излучения (§ 7-6).

На базе автоматических потенциометров со шкалой в милливольтах без изменения измерительной схемы выпускаются миллиамперметры и вольтметры для работы с измерительными устройствами, имеющими унифицированный выходной сигнал постоянного тока.

В миллиамперметрах, используемых для измерения силы постоянного тока 0—5 и 0—20 мА, на входе измерительной схемы потенциометра (зажимы *3* и *4*, рис. 4-18-1) устанавливают резистор с номинальным сопротивлением R_a, равным 2 и 0,5 Ом соответственно (рис. 4-18-1, *б*). Ток от измерительного устройства, протекая по резистору R_a, создает падение напряжения 0—10 мВ, которое уравновешивается компенсирующим напряжением измерительной схемы.

В вольтметрах, применяемых для измерения напряжения постоянного тока 0—10 В, на входе потенциометра (зажимы *3* и *4*, рис. 4-18-1) устанавливают делитель напряжения с резисторами R_b и R_{b1} (рис. 4-18-1, *в*), который рассчитан таким образом, чтобы на прибор подавалось напряжение, соответствующее его диапазону измерений в милливольтах. В выпускаемых вольтметрах, например типа КСУ2, имеющих диапазон измерения 0—100 мВ, резисторы делителя имеют сопротивление $R_b = 50 \pm 0{,}3$ Ом и $R_{b1} = 5000 \pm \pm 5$ Ом.

В автоматических потенциометрах со шкалой в милливольтах, в миллиамперметрах и вольтметрах все резисторы измерительной схемы изготовляют из манганиновой проволоки.

4-19. Методика расчета сопротивлений резисторов измерительной схемы автоматических потенциометров

На рис. 4-19-1 представлена принципиальная компенсационная измерительная схема автоматического потенциометра, питаемая от стабилизированного источника питания *ИПС*. В целях упрощения на схеме усилитель показан в виде нулевого индикатора *НИ*, а $R_{н.р}$ представляет собой нормированное сопротивление реохорда:

$$R_{н.\,р} = \frac{R_р R_ш}{R_р + R_ш}. \qquad (4\text{-}19\text{-}1)$$

Нормированное значение сопротивления реохорда $R_{н.р}$ для выпускаемых общепромышленных автоматических потенциометров обычно принимается равным $90 \pm 0{,}1$ Ом (КСП4) или $100 \pm 0{,}1$ Ом (КСП2).

Остальные обозначения на рис. 4-19-1 соответствуют принятым на рис. 4-18-1.

Сопротивление резисторов $R_н = R'_н + r_н$ и $R_п = R'_п + r_п$ измерительной схемы потенциометра при их изготовлении подгоняют с определенным допуском для каждого резистора, используя для удобства градуировки прибора подгоночные резисторы $r_н$ и $r_п$, сопротивление которых обычно принимается равным 0,5—0,7 Ом.

Для удобства дальнейшего изложения введем следующие дополнительные обозначения: $R_I = R_I' + R_I''$ — резисторы в цепи *ИПС*; λ — нерабочие участки реохорда, обычно принимаются равными 0,02—0,03 значения приведенного сопротивления реохорда $R_{пр}$ (параллельно соединенных $R_{н.р}$ и $R_п$); t_0 и t_0' — расчетное и возможное значения температуры свободных концов термометра или термоэлектродных проводов; $E(t_н, t_0)$ — значение термо-э. д. с. термометра при температурах рабочего конца $t_н$, что соответствует начальному значению шкалы, и свободных концов t_0; $E(t_к, t_0)$ — значение термо-э. д. с. термометра при температуре рабочего конца $t_к$, соответствующей конечному значению шкалы, и свободных концов t_0; $E_д = E(t_к, t_0) - E(t_н, t_0)$ — диапазон измерений прибора; t — текущее значение температуры рабочего конца термометра; $R_м$ — сопротивление резистора из меди при расчетном значении температуры свободных концов термометра t_0; I_1 — номинальное значение силы тока в верхней ветви измерительной схемы при расчетном значении $R_м$ и нормальной температуре окружающего воздуха; I_2 — номинальное значение силы тока в нижней ветви измерительной схемы при расчетном значении $R_м$ и нормальной температуре окружающего воздуха; $I_0 = I_1 + I_2$ — номинальное значение силы тока в цепи *ИПС* при расчетном значении $R_м$ и нормальной температуре окружающего воздуха; $U_{и.п}$ — выходное напряжение *ИПС* при заданной нагрузке $R_{и.п}$; $U_к$ — номинальное значение падения напряжения на резисторе $R_к$ при нормальной температуре окружающего воздуха.

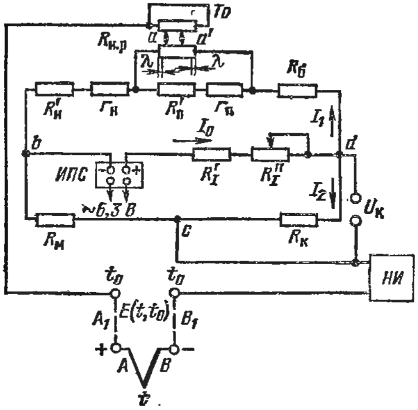


Рис. 4-19-1. Принципиальная компенсационная измерительная схема автоматического потенциометра.

Согласно принятым условиям и введенным обозначениям имеем:

$$E_д = E(t_к, t_0) - E(t_н, t_0) = I_1 R_{пр}(1 - 2\lambda), \tag{4-19-2}$$

$$R_{пр} = \frac{R_{н.р} R_п}{R_{н.р} + R_п}. \tag{4-19-3}$$

Пользуясь уравнениями (4-19-2) и (4-19-3), определим $R_п$:

$$R_п = \frac{R_{н.р} E_д}{I_1 R_{н.р}(1 - 2\lambda) - E_д}. \tag{4-19-4}$$

Напомним, что $R_к$ является контрольным резистором и служит для контроля рабочего тока I_2, а вместе с тем и I_1 при градуировке или поверке потенциометра при нормальной температуре окружающего воздуха. При номинальном значении рабочего тока I_2 падение напряжения на $R_к$ должно быть равно $U_к$ и, таким образом,

$$R_к = \frac{U_к}{I_2}. \tag{4-19-5}$$

Если измерительная схема потенциометра при термо-э. д. с. термометра $E(t_н, t_0)$, соответствующей начальному значению шкалы, уравновешена, т. е. ток в цепи термометра равен нулю в пределах чувствительности нуль-индикатора, то по закону Кирхгофа будем иметь:

для контура *cba АВНИс*

$$R_м I_2 - R_н I_1 - \lambda R_{пр} I_1 + E(t_н, t_0) = 0; \tag{4-19-6}$$

для контура *cda АВНИс*

$$R_б I_1 + (1-\lambda) R_{пр} I_1 - R_к I_2 + E(t_н,\ t_0) = 0. \qquad (4\text{-}19\text{-}7)$$

Пользуясь уравнениями (4-19-6) и (4-19-7), определим $R_н$ и $R_б$:

$$R_н = \frac{R_м I_2 - \lambda R_{пр} I_1 + E(t_н,\ t_0)}{I_1}; \qquad (4\text{-}19\text{-}8)$$

$$R_б = \frac{R_к I_2 - (1-\lambda) R_{пр} I_1 - E(t_н,\ t_0)}{I_1}. \qquad (4\text{-}19\text{-}9)$$

При произвольном значении измеряемой температуры t и том же значении температуры t_0 выражение (4-19-6) перепишется в виде

$$R_м I_2 - R_н I_1 - \lambda R_{пр} I_1 - m(1-2\lambda) R_{пр} I_1 + E(t,\ t_0) = 0, \qquad (4\text{-}19\text{-}10)$$

где $m = R'_{пр}/R_{пр}$ и $R'_{пр}$ — часть приведенного сопротивления реохорда левее точки a'.

При изменении температуры свободных концов термоэлектрического термометра до значения $t'_0 > t_0$ будет изменяться и сопротивление резистора $R_м$ в соответствии с выражением

$$R'_м = \frac{R_м(1+\alpha t'_0)}{1+\alpha t_0}, \qquad (4\text{-}19\text{-}11)$$

где α — температурный коэффициент электрического сопротивления меди.

Расчетные формулы, составленные с учетом изменения токов I_1 и I_2 в измерительной схеме потенциометра при изменении температуры свободных концов термоэлектрического термометра, а следовательно, и $R_м$, получаются достаточно сложными. Поэтому для упрощения расчетов принимается условие $I_2 = \mathrm{const}$ при любом значении температуры t'_0 от 5 до 50°С резистора $R_м$. Расчеты, проведенные при условиях $I_2 = \mathrm{var}$ и $I_2 = \mathrm{const}$, показывают, что изменения показаний прибора, а следовательно, и погрешности компенсации изменения термо-э. д. с. термометра, вызываемые изменением температуры его свободных концов, различаются незначительно. Если не учитывать изменение I_2, то при увеличении температуры свободных концов термометра до t'_0 уравнение (4-19-10) принимает вид:

$$\frac{R_м I_2 (1+\alpha t'_0)}{1+\alpha t_0} - R_н(I_1+\Delta I_1) - \lambda R_{пр}(I_1+\Delta I_1) -$$
$$- m(1-2\lambda) R_{пр}(I_1+\Delta I_1) + E(t,\ t_0) - E(t'_0,\ t_0) = 0. \qquad (4\text{-}19\text{-}12)$$

Вычитая из этого уравнение (4-19-10), получаем:

$$\frac{R_м I_2 \alpha (t'_0 - t_0)}{1+\alpha t_0} - \Delta I_1 [R_н + \lambda R_{пр} + m(1-2\lambda) R_{пр}] - E(t'_0,\ t_0) = 0. \qquad (4\text{-}19\text{-}13)$$

Из уравнения (4-19-10) найдем

$$R_н + \lambda R_{пр} + m(1-2\lambda) R_{пр} = \frac{R_м I_2 + E(t,\ t_0)}{I_1}$$

и после подстановки правой части этого выражения в уравнение (4-19-13) получим:

$$\frac{R_м I_2 \alpha (t'_0 - t_0)}{1+\alpha t_0} - \frac{R_м I_2 \Delta I_1}{I_1} - \frac{\Delta I_1 E(t,\ t_0)}{I_1} - E(t'_0,\ t_0) = 0. \qquad (4\text{-}19\text{-}14)$$

В момент равновесия измерительной схемы и при значении t'_0 ток $I'_1 = I_1 + \Delta I_1$ определяется уравнением

$$I'_1 = I_2 \left(\frac{R_к + R'_м}{R_н + R_{пр} + R_б} \right)$$

или

$$(I_1 + \Delta I_1)(R_н + R_{пр} + R_б) = I_2 \left[R_к + \frac{R_м(1+\alpha t'_0)}{1+\alpha t_0} \right].$$

Подставляя в это уравнение $R_н$ (4-19-8) и $R_б$ (4-19-9), после преобразования имеем:

$$\Delta I_1 = I_1 \frac{R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{(R_м + R_к)(1 + \alpha t_0)}. \tag{4-19-15}$$

Подставляя в уравнение (4-19-14) значение ΔI_1, получим условие компенсации изменения термо-э. д. с. термометра, вызываемого изменением температуры его свободных концов:

$$\frac{R_м I_2 \alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0} - \left[\frac{R_м I_2 R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{(R_м + R_к)(1 + \alpha t_0)} + \frac{E(t, t_0) R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{(R_м + R_к)(1 + \alpha t_0)}\right] = E(t'_0, t_0). \tag{4-19-16}$$

Два члена в уравнении (4-19-16), заключенные в квадратые скобки, выражают поправку, учитывающую влияние изменения тока I_1, в измерительной схеме прибора.

Пользуясь уравнением (4-19-16), определим $R_м$:

$$R_м = \frac{R_к E(t'_0, t_0)}{I_2 R_к \frac{\alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0} - E(t'_0, t_0) - E(t, t_0) \frac{\alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0}}. \tag{4-19-17}$$

Для уменьшения изменения погрешности потенциометра, вызванного отклонением температуры свободных концов термометра от t_0, целесообразно определять $R_м$ для значения

$$E(t, t_0) = E(t_{ср}, t_0) = \frac{E(t_к, t_0) + E(t_н, t_0)}{2}. \tag{4-19-18}$$

При расчете $R_м$ указанным путем следует иметь в виду, что для всех значений $E(t, t_0) \neq E(t_{ср}, t_0)$ в пределах диапазона измерений возможно изменение показаний потенциометра за счет неполной компенсации изменения термо-э. д. с. термометра, вызванного изменением температуры свободных концов его от значения t_0. Для определения изменения показаний потенциометра вследствие этого фактора воспользуемся вторым членом поправки в квадратных скобках уравнения (4-19-16) и с учетом условия (4-19-18) для конечного значения шкалы получим:

$$\Delta E_п = \frac{E(t_к, t_0) + E(t_н, t_0)}{2(R_м + R_к)} \frac{R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0} - \frac{E(t_к, t_0)}{R_м + R_к} \frac{R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0}. \tag{4-19-19}$$

После преобразования это выражение принимает вид:

$$\Delta E_п = -\frac{E_д}{2(R_м + R_к)} \frac{R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0}. \tag{4-19-20}$$

Аналогично для начального значения шкалы

$$\Delta E_п = \frac{E_д}{2(R_м + R_к)} \frac{R_м \alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0}. \tag{4-19-21}$$

Изменение показаний потенциометра в процентах от диапазона измерений равно

$$\delta_п = \pm \frac{\Delta E_п}{E_д} 100 = \pm \frac{R_м}{2(R_м + R_к)} \frac{\alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0} 100. \tag{4-19-22}$$

Из этого выражения следует, что изменение показаний потенциометра прямо пропорционально $(t'_0 - t_0)$, поэтому для уменьшения значения $\delta_п$ температуру t_0 при расчете $R_м$ следует выбирать близкой к среднему значению допускаемого интервала изменения температуры окружающего воздуха.

Поскольку резистор $R_м$ находится внутри корпуса потенциометра (КСП2) или с внешней стороны его (КСП4), то при расчете в первом случае принимают температуру $t_0 = 30°C$, а во втором $t_0 = 20°C$.

Определим сопротивление резисторов в цепи источника стабилизированного питания $R_I = R_I' + R_I''$. При расчетном значении температуры свободных концов термометра t_0 сопротивление измерительной схемы относительно зажимов b и d определяется выражением

$$R_{bd} = \frac{(R_м + R_к)(R_н + R_{пр} + R_б)}{R_м + R_к + R_н + R_{пр} + R_б}. \qquad (4\text{-}19\text{-}23)$$

Сопротивление резистора R_I определяется по формуле

$$R_I = R_{и.п} - R_{bd}. \qquad (4\text{-}19\text{-}24)$$

Для проверки правильности расчета сопротивлений резисторов измерительной схемы потенциометра можно воспользоваться формулой

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_м + R_к}{R_н + R_{пр} + R_б}. \qquad (4\text{-}19\text{-}25)$$

При расчете сопротивлений резисторов необходимо учитывать сопротивление проводников, применяемых для соединения этих резисторов при выполнении измерительной схемы приборов.

Пример. Расчет сопротивлений резисторов компенсационной измерительной схемы автоматического потенциометра типа КСП4.

Задано

Шкала прибора	200—600°С
Градуировка термоэлектрического термометра	ХА
Расчетное значение температуры свободных концов термометра	$t_0 = 20$°С
Возможное значение температуры свободных концов термометра	$t'_0 = 50$°С
Начальное значение шкалы	$E(t_н, t_0) = 7{,}33$ мВ
Конечное значение шкалы	$E(t_к, t_0) = 24{,}11$ мВ
Диапазон измерений	$E_д = 16{,}78$ мВ
Нормированное номинальное сопротивление реохорда . .	$R_{н.р} = 90$ Ом
Нерабочие участки реохорда ($\lambda = 0{,}025$)	$2\lambda = 0{,}05$
Нормированное номинальное значение падения напряжения на резисторе $R_к$	$U_к = 1019$ мВ
Выходное напряжение ИПС-148П	$U_{и.п} = 5$ В
Номинальное значение силы тока в цепи ИПС-148П . . .	$I_0 = 5$ мА
Сопротивление нагрузки ИПС-148П	$R_{и.п} = 1000$ Ом
Номинальное значение силы тока в верхней ветви измерительной схемы прибора	$I_1 = 3$ мА
Номинальное значение силы тока в нижней ветви измерительной схемы прибора	$I_2 = 2$ мА
Температурный коэффициент электрического сопротивления меди[1]	$\alpha = 4{,}25 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$

[1] Точное значение α для данной медной проволоки определяют опытным путем.

По формуле (4-19-4) определим $R_п$:

$$R_п = \frac{R_{пр} E_д}{I_1 R_{пр}(1 - 2\lambda) - E_д} = \frac{90 \cdot 16{,}78}{3 \cdot 90 \cdot (1 - 0{,}05) - 16{,}78} = \frac{1510{,}20}{239{,}72} = 6{,}2998 \approx 6{,}3 \text{ Ом};$$

принимаем $R_п' = 6{,}0 \pm 0{,}05$ Ом и $r_п = 0{,}6$ Ом.

Определим приведенное сопротивление реохорда $R_{пр}$ по формуле (4-19-3)

$$R_{пр}=\frac{R_{н.\,р}R_{п}}{R_{н.\,р}+R_{п}}=\frac{90\cdot 6,2998}{90+6,2998}=\frac{566,9820}{96,2998}=5,8877\ Ом.$$

Произведем проверку правильности определения $R_{пр}$ по формуле (4-19-2)

$$E_{д}=I_1R_{п.\,р}(1-2\lambda)=3\cdot 5,8877\,(1-0,05)=16,7802\approx 16,78\ мВ.$$

Определим $R_к$ по формуле (4-19-5):

$$R_к=\frac{U_к}{I_2}=\frac{1019}{2}=509,5\ Ом.$$

Принимаем значение сопротивления контрольного резистора $R_к = 509,5 \pm 0,2$ Ом.

По формуле (4-19-9) определим $R_б$:

$$R_б=\frac{R_кI_2-(1-\lambda)R_{пр}I_1-E\,(t_н,\ t_0)}{I_1}=$$

$$=\frac{509,5\cdot 2-(1-0,025)\cdot 5,8877\cdot 3-7,33}{3}=\frac{994,4485}{3}=331,4828\ Ом;$$

принимаем значение сопротивления резистора $R_б = 332 \pm 0,5$ Ом.

Найдем сопротивление медного резистора $R_м$ по уравнению (4-19-17) с учетом (4-19-18):

$$R_м=\frac{R_кE\,(t_0',\ t_0)}{I_2R_к\frac{\alpha\,(t_0'-t_0)}{1+\alpha t_0}-E\,(t_0',\ t_0)-E\,(t_{ср},\ t_0)\frac{\alpha\,(t_0'-t_0)}{1+\alpha t_0}}=$$

$$=\frac{509,5\cdot 1,22}{2\cdot 509,5\cdot 0,1175-1,22-15,72\cdot 0,1175}=\frac{621,590}{116,6654}=5,3279\ Ом;$$

принимаем значение сопротивления медного резистора $R_м = 5,33 \pm 0,01$ Ом.

Определим значение сопротивления резистора $R_н$ по формуле (4-19-8)

$$R_н=\frac{R_мI_2-\lambda R_{пр}I_1+E\,(t_н,\ t_0)}{I_1}=\frac{2\cdot 5,3279-0,025\cdot 5,8877\cdot 3+7,33}{3}=$$

$$=\frac{17,5634}{3}=5,8481\ Ом;$$

принимаем $R_н = 5,3 \pm 0,05$ Ом и $r_н = 0,7$ Ом.

Определим, пользуясь уравнением (4-19-23), значение R_{bd}:

$$R_{bd}=\frac{(R_м+R_к)\,(R_н+R_{пр}+R_б)}{R_м+R_к+R_н+R_{пр}+R_б}=$$

$$=\frac{(5,3279+509,5)\,(5,8481+5,8877+331,4828)}{5,3279+509,5+5,8481+5,8877+331,4828}=\frac{176698,5454}{858,0466}=205,9\ Ом.$$

Определим R_I по формуле (4-19-24):

$$R_I=R_{и.\,п}-R_{bd}=1000-205,9=794,1\ Ом;$$

принимаем $R_I = 800$ Ом, $R_I' = 750 \pm 1$ Ом и $R_I'' = 50 \pm 5$ Ом.

Определим изменение показаний потенциометра для конечного значения шкалы при изменении температуры свободных концов термометра от $t_0 = 20°C$ до $t_0' = 50°C$ по формуле (4-19-22):

$$\delta_п=-\frac{R_м}{2\,(R_м+R_к)}\frac{\alpha\,(t_0'-t_0)}{1+\alpha t_0}100=$$

$$=-\frac{5,3279}{2\cdot 5,3279+509,5}\cdot 0,1175\cdot 100=-0,06\%.$$

4-20. Основные сведения об усилителях

В автоматических потенциометрах применяются усилители переменного тока, снабжаемые входным устройством для преобразования напряжения небаланса постоянного тока, поступающего с измерительной схемы прибора на вход его, в напряжение переменного тока частотой 50 Гц. Входное устройство таких усилителей состоит из вибропреобразователя и входного трансформатора.

Усилители переменного тока, применяемые в автоматических уравновешенных мостах (гл. 5), снабжаются только входным трансформатором.

Входное устройство усилителей служит одновременно для согласования с помощью входного трансформатора сопротивления изме-

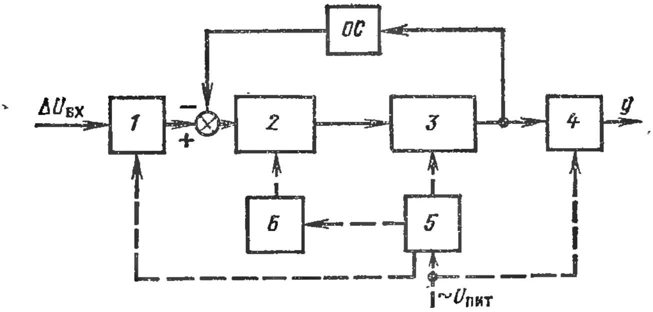


Рис. 4-20-1. Структурная схема усилителя.

рительной схемы прибора с сопротивлением усилителя напряжения и в некоторых случаях для гальванической развязки измерительной схемы от «земли». Такие важные показатели усилителя, как помехоустойчивость и уровень внутренних шумов, в основном определяется входным устройством.

В автоматических потенциометрах и других вторичных приборах прежних разработок, применяющихся в различных отраслях промышленности, использовались электронные ламповые усилители типа УЭУ (или УЭ) и УЭМ (или УМ). В приборах новых разработок типа КПП, КСП и других, выпускаемых в настоящее время, применяют полупроводниковые усилители типа УПД, а в некоторых модификациях этих приборов используются электронные ламповые усилители УЭД.

На рис. 4-20-1 показана структурная схема усилителя, состоящего из следующих элементов: *1* — входного устройства; *2* — усилителя напряжения; *3* — усилителя мощности; *4* — реверсивного двигателя (нагрузка усилителя); *5* — силового трансформатора; *6* — выпрямителя; *ОС* — устройства отрицательной обратной связи. Обратная связь в усилителе позволяет обеспечить заданные динамические свойства прибора.

Входное устройство усилителей с входным напряжением постоянного тока. Входное устройство этого типа, служащее для преобразования нескомпенсированного напряжения постоянного тока, возникающего вследствие разбаланса измерительной схемы прибора, в напряжение переменного тока частотой 50 Гц, состоит из вибрационного преобразователя *ВП*, входного трансформатора *ВТр* и конденсатора C_1 (рис. 4-20-2).

Вибрационный преобразователь *ВП*, являющийся типовым для всех усилителей (рис. 4-20-3), представляет собой однополюсный поляризованный переключатель на два положения. Он состоит из постоянного магнита *6*; обмотки (катушки) возбуждения *7*, питаемой переменным током частотой 50 Гц, напряжением 6,3 В от вторичной обмотки силового трансформатора усилителя;

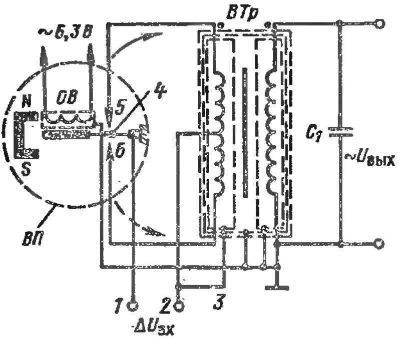


Рис. 4-20-2. Входное устройство усилителя с входным напряжением постоянного тока.

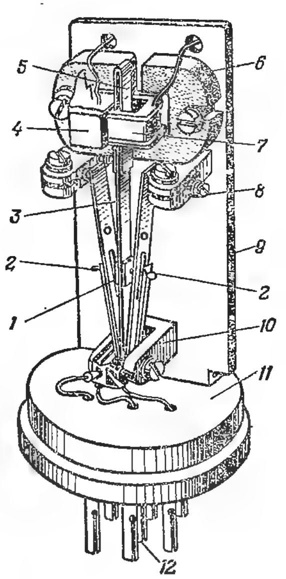


Рис. 4-20-3. Вибрационный преобразователь типа ВП.

якоря из магнитомягкой стали *5*, который прикреплен к верхнему концу плоской бронзовой пластины *3*. Катушка возбуждения закрыта экраном *4*. Нижний конец плоской пластины закреплен в скобе *10*, а верхний ее конец с якорем, проходящим внутри катушки возбуждения, находится над полюсами постоянного магнита. При прохождении тока через катушку возбуждения якорь пластины вибрирует с частотой тока питания. При этом расположенные в нижней части пластины якоря плоские платиноиридиевые контакты *1* касаются поочередно неподвижных платиноиридиевых игольчатых контактов *2*, укрепленных на пружинных держателях. Для регулировки режима работы и расстояния между каждым из игольчатых контактов и плоскими контактами пластины якоря служат винты *8*.

Для подведения питания к катушке возбуждения, а также для соединения пластины якоря и игольчатых контактов со схемой слу-

жат пять токоподводящих штырей. Шестой штырь вибрационного преобразователя служит для соединения с корпусом прибора стойки *9*. Кроме того, имеется центральный штырь — ключ *12*, который служит для правильной ориентировки при установке вибрационного преобразователя. Все штыри, впрессованы в пластмассовый цоколь *11*. Вибрационный преобразователь закрывается кожухом из магнитомягкой стали (на рис. 4-20-3 кожух не показан).

Напряжение небаланса $\Delta U_{вх}$ с измерительной схемы прибора подводится через зажим *1* к пластине якоря *ВП* и через зажим *2* к средней точке первичной обмотки входного трансформатора *ВТр* (рис. 4-20-2). Если компенсирующее напряжение U_{ac} измерительной схемы прибора больше измеряемой термо-э. д. с. E (t, t_0) термометра, то ток во входном устройстве (рис. 4-20-2) пойдет в направлении, указанном сплошной стрелкой, в течение полупериода, когда замкнуты контакты *4* и *5* и пунктирной в течение полупериода, когда замкнуты контакты *4* и *6*. Если полярность сигнала изменится на обратную $U_{ac} < E$ (t, t_0), то направление тока тоже изменится на обратное, и токи в первичной обмотке входного трансформатора потекут от средней точки к краям обмотки. При наличии напряжения небаланса в измерительной схеме прибора через первичную обмотку входного трансформатора попеременно проходит ток то в одном, то в другом направлении, создавая в сердечнике трансформатора переменное магнитное поле, которое индуцирует во вторичной его обмотке переменное напряжение с частотой тока питания обмотки возбуждения *ОВ*. Фаза вторичного напряжения трансформатора *ВТр* либо совпадает с фазой напряжения питания, либо противоположна ей, в зависимости от знака напряжения небаланса.

Для защиты от внешних магнитных полей входной трансформатор, выполненный на пермаллоевом сердечнике, заключен в двойной пермаллоевый экран. Обмотки трансформатора разделяют два электростатических экрана: плавающий экран выведен на контакт *3* или специальный наконечник входного жгута, экран вторичной обмотки заземляется. При включении источника переменной э. д. с. емкостные токи между первичной обмоткой трансформатора и корпусом усилителя проходят не через обмотки трансформатора, а между экранами, и на вторичной обмотке трансформатора не будет наводиться паразитная э. д. с. Существуют различные модификации входных трансформаторов, обеспечивающие заданные значения входного сопротивления усилителей.

Вторичная обмотка входного трансформатора и емкость C_1 образуют резонансный контур, что повышает избирательные свойства входного устройства на частоте 50 Гц и его помехоустойчивость.

Коэффициент трансформации входного трансформатора равен в зависимости от модификации 10—17.

Электронный ламповый усилитель. Рассмотрим в качестве примера ламповый усилитель УЭД1-03, применяемый в некоторых модификациях автоматических потенциометров типа КСП4. Усилитель УЭД1-03 (рис. 4-20-4) содержит входное устройство, усилитель

напряжения, усилитель мощности (выходной каскад), силовой трансформатор *Тр*, выпрямитель (*Д*$_2$—*Д*$_5$) и переходный трансформатор *ПТр*. Нагрузкой усилителя является обмотка управления реверсивного двигателя РД-09, шунтированная конденсатором емкостью 1 мкФ.

Питание усилителя осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 В. Мощность, потребляемая усилителем из сети, не превышает 25 В·А.

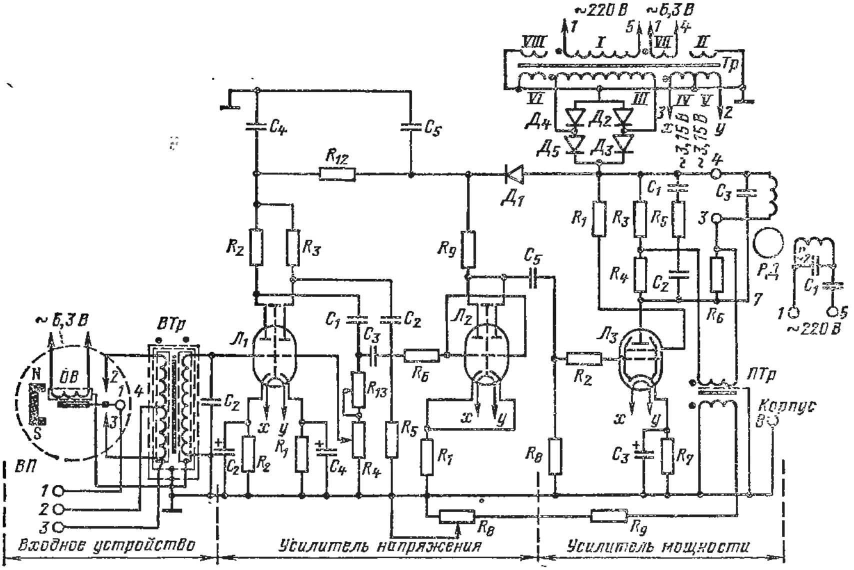


Рис. 4-20-4. Принципиальная схема электронного усилителя типа УЭД1-03.

Усилитель напряжения содержит три унифицированных каскада усиления напряжения, выполненных на двойных триодах с большим коэффициентом усиления типа 6Н2П (*Л*$_1$ и *Л*$_2$). Каскады усиления напряжения работают с автоматическим смещением. Левая и правая половины лампы *Л*$_2$ включены параллельно, образуя третий каскад усиления напряжения.

Для снижения сеточного тока при перегрузках 3-го каскада усилителя по входному напряжению в сеточную цепь лампы *Л*$_2$ введен ограничительный резистор R_6.

В усилителях типа УЭД применен однотактный выходной каскад усиления мощности, выполненный на лучевом тетроде 6П1П. Поскольку выходной каскад питается пульсирующим током частотой 100 Гц, то в выходном сигнале и в обмотке управления реверсивного двигателя РД-09 появляется небольшая постоянная составляющая напряжения.

Усилитель мощности и третий каскад усиления напряжения охвачены отрицательной обратной связью (резисторы R_8 и R_9). Сигнал обратной связи зависит от частоты вращения ротора реверсивного двигателя, включенного на выходе усилителя, и его значение можно изменять с помощью переменного резистора R_8. Это позволяет воздействовать на процесс успокоения всей следящей системы прибора. Для получения э. д. с., пропорциональной частоте вращения ротора реверсивного двигателя, в выходной блок усилителя введен тахометрический мост.

состоящий из резисторов R_3 — R_6 и конденсаторов C_1 и C_2. Управляющая обмотка реверсивного двигателя также является одним из плеч этого моста, а конденсатор C_3, шунтирующий эту обмотку, включен в диагональ его. Тахометрический мост настроен на частоту 50 Гц и рассчитан так, что балансировка его не нарушается и на остальных частотах в пределах всей полосы пропускания усилителя.

Благодаря наличию тахометрического моста в цепь обратной связи поступает в основном напряжение с управляющей обмотки двигателя, а напряжение, имеющееся на выходе усилителя, в значительной степени подавляется. Для гальванической развязки по постоянному току в каскаде усилителя мощности применен переходный трансформатор *ПТр* с соотношением витков в обмотках 2 : 1. Этот трансформатор, выполненный на пермаллоевом сердечнике, имеет большое входное сопротивление, что позволяет уменьшить нагрузку тахометрического моста.

При правильной настройке усилителя указатель прибора при ступенчатом изменении сигнала на входе должен устанавливаться на новом значении, сделав не более двух полуколебаний возле нового положения равновесия, а размер первого выброса не должен превышать 1% длины шкалы. При настройке усилителя прибора пользуются регулятором чувствительности (усиления) R_4 и регулируемым резистором обратной связи R_8. При регулировке успокоения указателя потенциометра необходимо руководствоваться заводской инструкцией.

Обмотка *УП* (зажимы *1* и *4*) силового трансформатора *Тр* служит для питания измерительной схемы прибора.

Ниже приведены основные технические характеристики усилителей УЭД1-03 и УПД1-03:

Порог чувствительности, мкВ 10
Уровень внутренних шумов, мкВ 10
Входное сопротивление, Ом 500
Выходная мощность, В · А 1,5

Под порогом чувствительности усилителя понимается напряжение, численно равное алгебраической полуразности минимальных напряжений на входе, при которых усилитель отдаст реверсивному двигателю 0,05 номинальной выходной мощности при положительном и отрицательном знаках нагрузочного момента на валу двигателя. Под выходной мощностью усилителя понимается мощность, создающая вращающий момент на валу двигателя, при напряжении на входе, равном 50-кратному порогу чувствительности.

Уровень внутренних шумов основной частоты, приведенный ко входу усилителя (смещение нуля), есть напряжение, численно равное алгебраической полусумме минимальных напряжений на входе, при которых вал двигателя без нагрузки начинает вращаться в одну или другую сторону от положения равновесия в зависимости от размера и фазы подаваемого на вход компенсирующего напряжения.

Усилители полупроводниковые. Усилители полупроводниковые, применяемые в автоматических потенциометрах типа КСП, имеют шифр УПД1, а в автоматических уравновешенных мостах типа КСМ, шифр УПД2.

На рис. 4-20-5 показана принципиальная электрическая схема полупроводникового усилителя типа УПД1-03, состоящего из следующих узлов: входного устройства, усилителя напряжения, усилителя мощности и источника питания. Нагрузкой усилителя является обмотка управления реверсивного двигателя РД-09П2 (РД).

Усилитель напряжения состоит из пяти каскадов. Первые четыре каскада выполнены на транзисторах T_1—T_4 (МП41А) по схеме с общим эмиттером и раз-

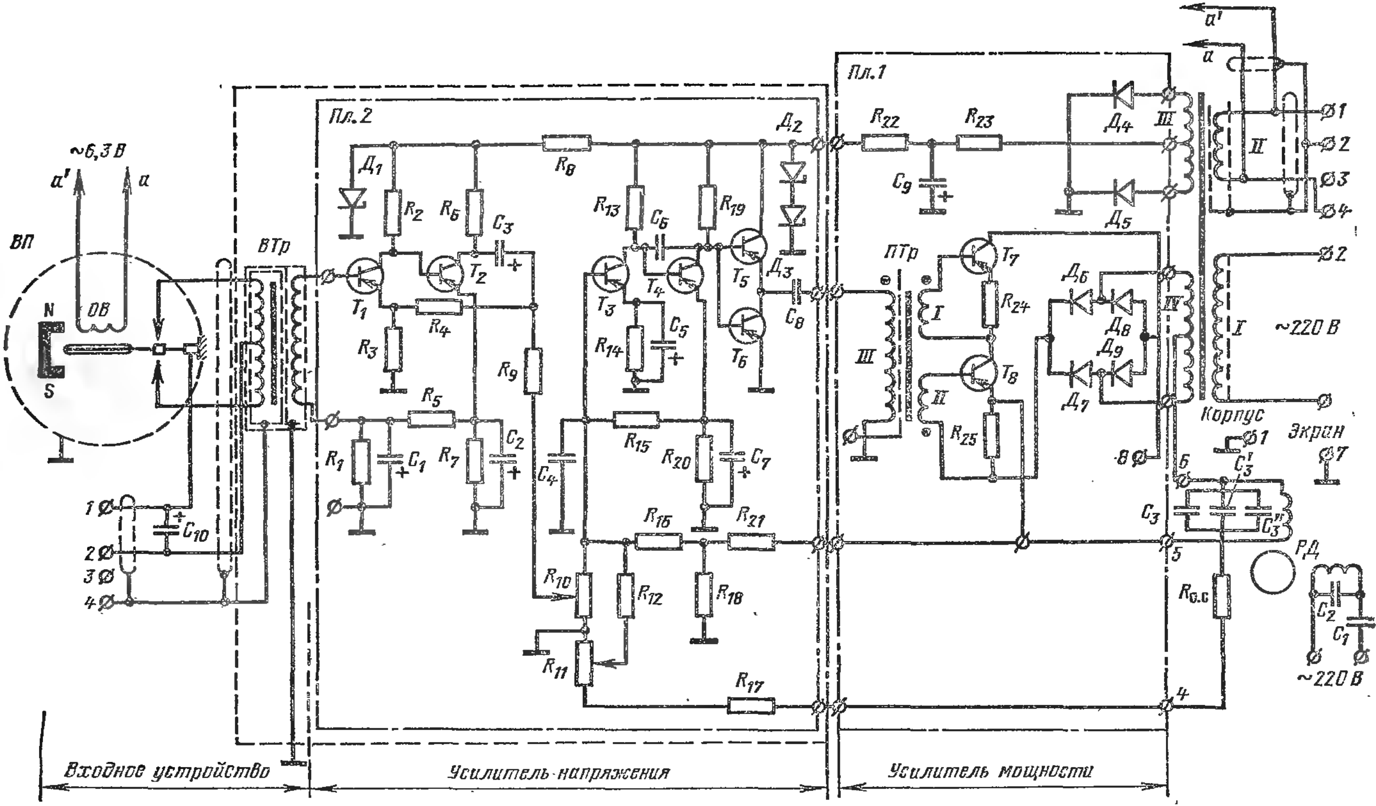


Рис. 4-20-5. Принципиальная схема полупроводникового усилителя типа УПД1-03.

биты на две группы, связанные между собой через конденсатор связи C_3. Пятый каскад выполнен по схеме составного эмиттерного повторителя с применением транзисторов различного типа проводимости (T_5 — МП25Б, T_6 — МП37Б). Питание каскадов усилителя напряжения осуществляется от двухполупериодного выпрямителя, выполненного на диодах $Д_4$—$Д_5$ (Д226Б). Стабилизация напряжения производится с помощью стабилитронов $Д_1$ (Д814Б), $Д_2$ и $Д_3$ (Д814Д).

Регулируемый резистор R_{10} служит для регулировки чувствительности (усиления) усилителя, а резистор R_{11} является регулятором обратной связи, сигнал которой в приборах с временем прохождения указателя всей шкалы более 2,5 с поступает непосредственно с выхода усилителя (через ограничительный резистор $R_{о.с} = 75$ кОм), а в приборах с временем прохождения указателя всей шкалы 2,5 с и менее — с выхода тахометрического моста, включаемого в выходную цепь усилителя.

Усилитель мощности выполнен по схеме последовательного баланса с включением транзисторов T_7 и T_8 (П217В) по схеме с общим эмиттером. Связь усилителя мощности и усилителя напряжения выполнена через переходный трансформатор *ПТр*. Питание усилителя мощности осуществляется от выпрямителя, выполненного на диодах $Д_6$—$Д_9$ (Д226Б).

Обмотка *II* (зажимы *1* и *4*) силового трансформатора *Тр* служит для питания измерительной схемы прибора. Конденсаторы C_8, C_3' и C_3'', включенные параллельно управляющей обмотке реверсивного двигателя типа РД-09П2 (РД), имеют то же назначение, что и конденсатор C_3 в рассмотренной выше схеме.

Усилитель УПД2, применяемый в автоматических уравновешенных мостах (гл. 5), отличается от усилителя УПД1 входным устройством, которое состоит только из входного трансформатора.

Основные технические характеристики усилителя УПД1-03 и электронного лампового усилителя УЭД1-03 одинаковы.

4-21. Основные сведения об источниках стабилизированного питания

Для питания измерительной схемы автоматических потенциометров применяют источник стабилизированного питания постоянного тока (ИПС). Замена сухого элемента, широко применявшегося ранее в старых потенциометрах, стабилизированным источником питания имеет большое практическое значение, так как срок службы сухих элементов ограничен. Кроме того, применение стабилизированного источника питания исключает необходимость иметь в приборе нормальный элемент и механизм установки рабочего тока. При этом значительно упрощается кинематика механизма и повышается надежность эксплуатации приборов.

Рассмотрим электрическую принципиальную схему источника питания стабилизированного ИПС, применяемого в автоматических потенциометрах типа КСП, КПП и др. (рис. 4-21-1). Он состоит из повышающего трансформатора *Тр*; мостового выпрямителя $Д_1$—$Д_4$; Г-образного фильтра (C_1, C_2, R_1); стабилитрона Д814; медного резистора R_2 и резисторов R_3, R_4 и R_5.

Первичная обмотка трансформатора питается переменным током частотой 50 Гц, напряжением 6,3 В от обмотки силового трансформатора потенциометра. Для уменьшения влияния помех из сети обмотки трансформатора экранированы.

Напряжение 6,3 В повышается с помощью трансформатора, выпрямляется и стабилизируется с помощью стабилитрона $Д_5$ (Д814). Поскольку рабочая характеристика стабилитрона зависит от температуры окружающего воздуха, то для температурной компенсации его параметров используется медный резистор R_2, каркасом для которого служит корпус стабилитрона.

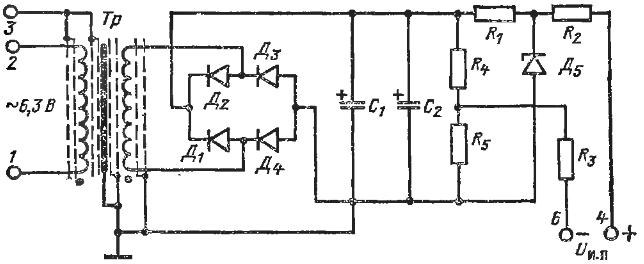


Рис. 4-21-1. Электрическая принципиальная схема источника питания стабилизированного типа ИПС.

Для увеличения коэффициента стабилизации предусмотрен делитель, состоящий из резисторов R_4 и R_5. Резистор R_3 предназначен для согласования выхода с нагрузкой $R_{н.и} = 1000$ Ом. Выходное напряжение источника стабилизированного питания $U_{и.п} = 5$ В при нагрузке 1000 Ом. Коэффициент стабилизации по напряжению при токе нагрузки $I_0 = 5$ мА не менее 500, что обеспечивает постоянство рабочего тока в измерительной схеме прибора с допускаемой погрешностью.

4-22. Устройство автоматических потенциометров

Автоматические потенциометры предназначены для измерения температуры и других величин, изменение которых может быть преобразовано в изменение напряжения постоянного тока, и по конструктивному оформлению подразделяются на следующие группы: показывающие (КПП1 и КВП1); показывающие и самопишущие с ленточной диаграммой (КСП1, КСП2 и КСП4); показывающие и самопишущие с дисковой диаграммой (КСП3). Потенциометры этих типов, изготовляемые с дополнительными устройствами в нескольких модификациях, применяются также для измерения и сигнализации или регулирования указанных выше величин. Потенциометры, так же как и другие вторичные приборы, разделяются на миниатюрные (КПП1, КВП1, КСП1), малогабаритные (КСП2, КСП3) и нормальногабаритные (КСП4).

Некоторые модификации показывающих и одноточечных самопишущих приборов указанных выше типов снабжаются выходными устройствами дистанционной передачи показаний для расширения функциональных возможностей средств измерений. Для этой цели

потенциометры типа КСП3 могут быть снабжены ферродинамическими, частотными или пневматическими передающими преобразователями, а также и различными сочетаниями их. В приборах других типов в качестве выходного устройства используется реостатный передающий преобразователь (гл. 8).

Сопротивление первичных преобразователей, работающих в комплекте с автоматическими потенциометрами, вместе с сопротивлением линии связи не должно превышать 200 Ом.

Миллиамперметры и вольтметры, выпускаемые на базе потенциометров указанных выше типов, имеют шифры КПУ1, КВУ1, КСУ1, КСУ2, КСУ3 и КСУ4.

Автоматические потенциометры показывающие. Автоматические показывающие потенциометры широко применяют в практике технологического контроля в качестве оперативных приборов. Они выпускаются с цилиндрическим вращающимся циферблатом (длина шкалы 500 мм) типа КВП1 и плоским неподвижным циферблатом (длина шкалы 300 мм) КПП1.

Показывающие потенциометры КВП1 выпускаются одноточечными и многоточечными для измерения температуры в комплекте со стандартными термоэлектрическими термометрами. Многоточечные приборы снабжаются встроенным 6 или 12-точечным кнопочным переключателем. Серийно выпускаемые потенциометры КВП1 имеют класс точности 0,5, а по специальному заказу могут быть изготовлены класса точности 0,25. Они выпускаются с временем прохождения циферблатом от начальной до конечной отметок шкалы относительно неподвижного указателя 2,5 или 10 с в зависимости от модификации.

Принципиальная схема потенциометра типа КВП1 приведена на рис. 4-22-1. Измерительная схема этого потенциометра отличается от рассмотренной выше типовой схемы (см. рис. 4-18-1) наличием дополнительного резистора R_1 из манганиновой проволоки, который обычно выполняют для всех диапазонов измерений равным $5 \pm \pm 0{,}05$ Ом. Кроме того, в измерительную схему включены подгоночные резисторы $r_н$, $r_п$, r. Приборы КВП1 снабжены устройством с кнопочным переключателем (КИ) для контроля исправности его. Это устройство на схеме показано пунктиром. При нажатии КИ замыкаются цепи термоэлектрического термометра и резистора $R_м$, а резисторы $R_н$ и $r_н$ шунтируются резистором R_2. Если прибор исправен, то цилиндрический циферблат должен занять положение, при котором контрольная отметка на его шкале находится против неподвижного указателя.

Назначение отдельных элементов и узлов схемы потенциометра КВП1 аналогично рассмотренным выше (см. рис. 4-18-1). Нормированное значение сопротивления реохорда $R_{н.р}$ принято равным $100 \pm 0{,}1$ Ом.

Все элементы и узлы прибора КВП1 размещены в общем корпусе. На лицевой стороне потенциометра (рис. 4-22-2) расположен кнопочный переключатель на 6 точек.

Автоматические показывающие потенциометры типа КПП1 имеют класс точности 0,5. Эти приборы в практике технологического контроля широко применяют с дополнительным переключателем в комплекте с термоэлектрическими термометрами для измерения температуры в нескольких точках. Потенциометры КПП1 выпускаются с временем прохождения указателем всей шкалы 2,5 или 10 с в зависимости от модификации. Измерительная схема прибора выполнена аналогично рассмотренной выше.

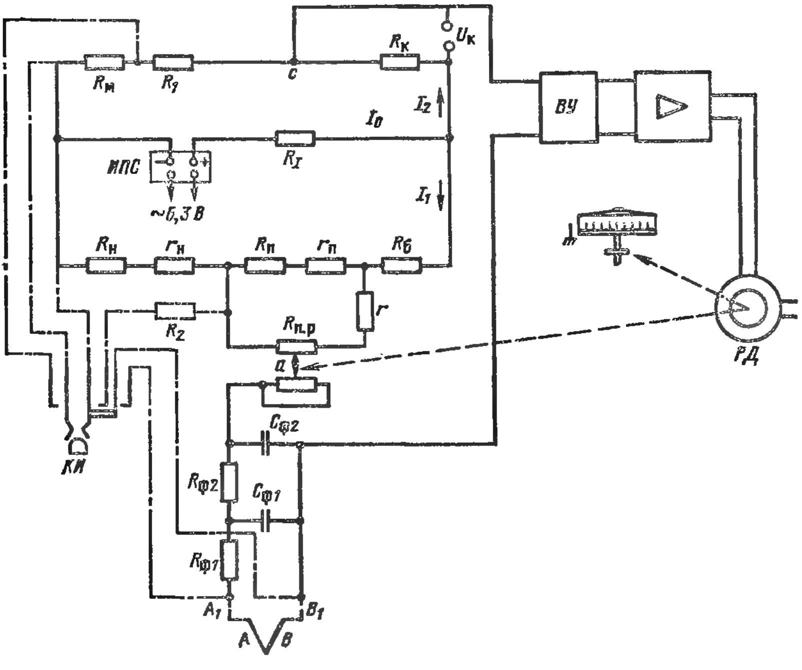


Рис. 4-22-1. Принципиальная схема автоматического потенциометра типа КВП1.

В приборах КПП1 и КВП1 реохорд выполнен в виде отдельного модуля. Рабочая и токосъемная спирали расположены на круглом пластмассовом основании реохорда. В этих потенциометрах устанавливаются полупроводниковые усилители УПД1-03 или УПД-04.

Автоматические потенциометры с дисковой диаграммой КСП3. Потенциометры типа КСП3 являются одноточечными приборами с дисковой диаграммой (длина отсчетной дуги 95 мм). Пределы допускаемой основной погрешности показаний прибора ±0,5%, а записи ±1% нормирующего значения измеряемой величины. Эти потенциометры выпускаются с временем прохождения указателем всей шкалы 5 и 16 с.

На рис. 4-22-3 приведена принципиальная схема потенциометра КСП3. Сопротивление спирали реохорда $R_р$ в этом потенциометре для всех модификаций принято равным приблизительно 270 Ом.

Даваемые в заводской монтажно-эксплуатационной инструкции на прибор КСП3 [11] рекомендации о возможности корректировать градуировку прибора по мере износа реохорда с помощью подгоночных резисторов $r_п$ следует считать ошибочными. Износ реохорда по его длине, как правило, неодинаковый и реохорд должен быть заменен новым. Замена старого реохорда на новый не создает каких-либо трудностей, если изготовлять его в виде отдельного модуля с заданным нормированным сопротивлением $R_{н.\,р}$.

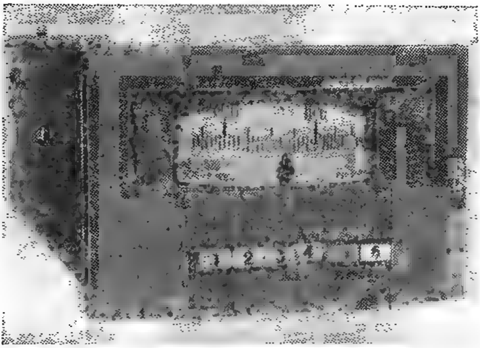


Рис. 4-22-2. Внешний вид показывающего автоматического потенциометра типа КВП1.

Резистор $R_в$ является вспомогательным, его сопротивление равно сопротивлению медного резистора $R_м$ при 0°С. При работе прибора резистор $R_в$ закорочен перемычкой (положение *И*). При поверке прибора перемычка ставится в положение *П*.

Потенциометр снабжен тумблером (контакты K_1 и K_2) для контроля исправности прибора. При замыкании контактов K_1 и K_2 шунтируется резистор $R_к$ резистором $R_{к.\,и}$ и закорачивается цепь термоэлектрического термометра. При этом перемычка должна быть установлена в положение *П*. При исправном приборе указатель должен занять положение против цветного индекса на шкале. Назначение остальных элементов схемы прибора КСП3 аналогично рассмотренным выше.

Измерительная схема потенциометров, работающих в комплекте с телескопами пирометров полного излучения, отличается от схемы рассмотренного потенциометра тем, что в цепь реохорда и резистора $R_п$ включен корректирующий резистор, назначение которого рассматривается ниже (гл. 7). Кроме того, резистор $R_м$ выполнен из манганиновой проволоки, а резистор $R_в$ отсутствует.

Внешний вид автоматического потенциометра типа КСП3 показан на рис. 4-22-4.

Автоматические потенциометры с ленточной диаграммой. Автоматические потенциометры с ленточной диаграммой выпускаются нормальных габаритов типа КСП4 классов точности 0,25 и 0,5, малогабаритные типа КСП2 класса точности 0,5 и миниатюрные типа КСП1 класса точности 1.

Потенциометры КСП4 выпускаются на одну точку и несколько (3, 6, 12) точек измерения с записью на складывающейся диаграмм-

ной ленте. Длина шкалы у этих приборов и ширина поля записи на диаграммной ленте 250 мм. Скорость продвижения диаграммной ленты лежит в следующих интервалах: у одноточечных приборов от 20 до 5400 мм/ч (I ряд) или от 200 до 54 000 мм/ч (II ряд); у многоточечных приборов — от 60 до 7200 мм/ч. Циклы печатания у многоточечных серийно выпускаемых потенциометров составляют 4 и 12 с (по специальным заказам 1 с).

Пределы допускаемой основной погрешности показаний приборов КСП4 классов точности 0,25 и 0,5 соответственно ±0,25 и ±0,5%,

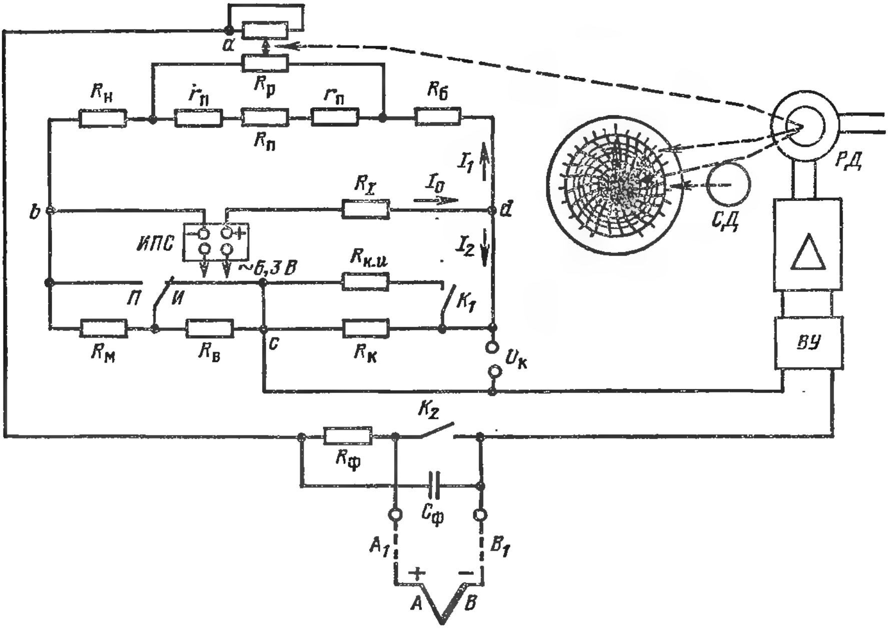


Рис. 4-22-3. Принципиальная схема автоматического потенциометра типа КСП3.

а записи ±0,5% нормирующего значения измеряемой величины. Потенциометры КСП4 выпускаются с временем прохождения указателем всей шкалы 2,5 и 5 с, а некоторые модификации одноточечных приборов — 1 с.

Приборы КСП4 выпускаются без дополнительных, а также с дополнительными регулирующими и сигнализирующими устройствами или реостатным преобразователем для дистанционной передачи информации. Некоторые модификации приборов снабжаются передающими преобразователями с выходным унифицированным сигналом постоянного тока 0—5 мА или 0—10 В. Пределы допускаемой основной погрешности унифицированного выходного сигнала не превышают ±1% нормирующего значения измеряемой величины.

Принципиальная схема автоматического одноточечного потенциометра КСП4 показана на рис. 4-22-5. Для питания измерительной

схемы прибора используется источник стабилизированного питания типа ИПС4. Для уменьшения влияния помех (§ 18-4) потенциометры КСП4 (миллиамперметры КСУ4) с временем прохождения указателем всей шкалы 2,5 и 5 с снабжают двойным Г-образным фильтром *Ф1*, состоящим из резисторов $R_{ф1}$, $R_{ф2}$, $R_{ф3}$ и конденсаторов $C_{ф1}$, $C_{ф2}$, $C_{ф3}$, а с временем прохождения указателем всей шкалы 1 с — двойным Т-образным фильтром *Ф2*, состоящим из резисторов $R_{ф4}$, $R_{ф5}$, $R_{ф6}$ и конденсаторов $C_{ф4}$, $C_{ф5}$, $C_{ф6}$.

В многоточечных потенциометрах КСП4 (и других приборах, выполняемых на его базе) для последовательного присоединения термоэлектрических термометров к измерительной схеме устанавливают двухполюсный переключатель *В3*. Через систему зубчатой передачи синхронный электродвигатель *СД* (тип СД-54) перемещает щетки переключателя с одной ламели на другую. Зажимы *e* и *f* переключателя соединяются с одноименными зажимами фильтров *Ф1* или *Ф2* (рис. 4-22-5).

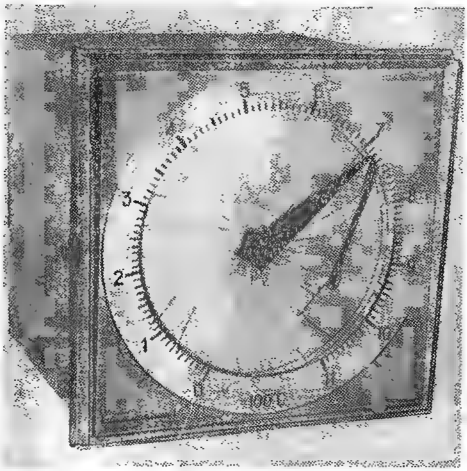


Рис. 4-22-4. Внешний вид автоматического потенциометра типа КСП3.

В приборах КСП4 применен линейный реохорд, который выполнен в виде отдельного модуля. Нормированное значение сопротивления реохорда для всех типов приборов КС4 принято равным $90 \pm 0,1$ Ом.

Назначение резисторов измерительной схемы и других элементов и узлов потенциометра КСП4 то же, что у рассмотренных выше. В выпускаемых в настоящее время приборах этого типа используется электронный усилитель типа УЭД1-03. В ближайшее время приборы КСП4 будут выпускаться с полупроводниковыми усилителями УПД.

В одноточечных приборах запись измеряемой величины осуществляется непрерывно на диаграммной ленте при движении каретки вдоль шкалы. Записывающее устройство состоит из полиэтиленовой трубки с пером, закрепленным на каретке, и чернильницы, установленной на кронштейне прибора.

В многоточечных приборах запись измеряемой величины осуществляется циклично нанесением на диаграммную ленту точек с порядковым номером термоэлектрического термометра (или другого преобразователя) в момент остановки каретки. Цифра, появляющаяся в окошке каретки, указывает номер термометра, сигнал которого

будет отрабатываться в следующем цикле печати. Записывающее устройство этого типа состоит из печатающего барабана с нанесенными на его поверхности точками с цифрами, и обоймы со смазывающими секторами, закрепленными на каретке.

Внешний вид потенциометра КСП4 показан на рис. 4-22-6. Стальной корпус прибора защищает все элементы его от внешних механических воздействий и от воздействия внешних магнитных полей. На задней стенке корпуса снаружи укреплены колодки

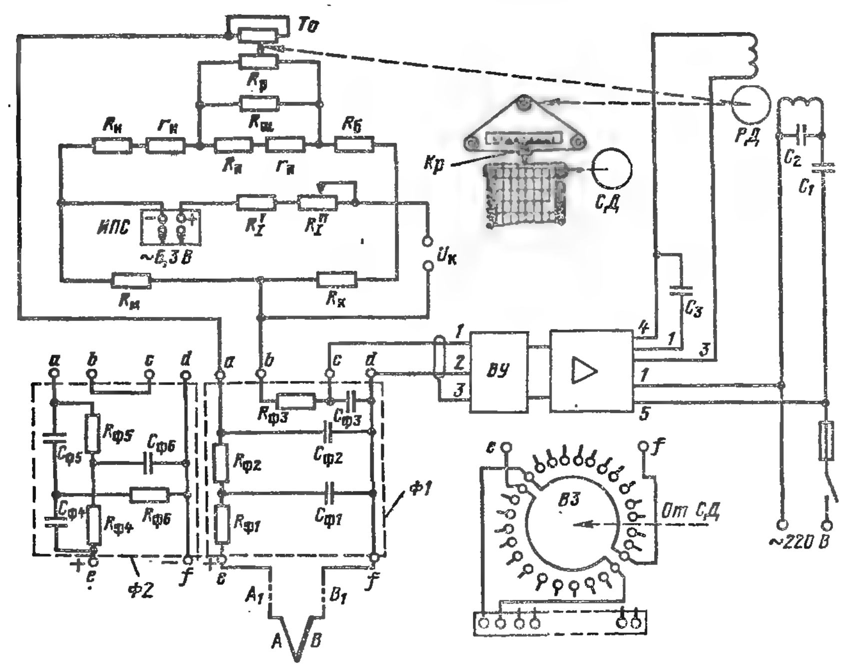


Рис. 4-22-5. Прииципиальная схема автоматического потеициометра типа КСП4.

внешних соединений и зажим «земля». Вблизи зажимов колодок устанавливают резистор $R_м$.

Автоматические показывающие и самопишущие потенциометры типа КСП2 выпускаются как одноточечные, так и многоточечные — на 3; 6 и 12 точек измерения. Длина шкалы и ширина диаграммной ленты у этих приборов 160 мм. Скорость продвижения диаграммной ленты от 20 до 720 мм/ч (I ряд) или от 600 до 3600 мм/ч (II ряд). Пределы допускаемой основной погрешности показаний приборов КСП2 ±0,5%, а записи ±1% нормирующего значения измеряемой величины. Они выпускаются в зависимости от модификации прибора с временем прохождения указателем всей шкалы 2,5 или 10 с.

Принципиальная схема автоматического потенциометра типа КСП2 аналогична схеме, показанной на рис. 4-22-5. Измерительная

схема прибора КСП2 незначительно отличается от схемы потенциометра КСП4 и выполнена аналогично схеме прибора КВП1 (см. рис. 4-22-1). Для уменьшения влияния помех все модификации приборов КСП2 снабжаются двойным Г-образным фильтром *Ф1* (см. рис. 4-22-5).

В приборах КСП2 используется полупроводниковый усилитель типа УПД1-03 (см. рис. 4-20-5). В потенциометрах КСП2 с временем прохождения кареткой всей шкалы 2,5 с для осуществления скоростной обратной связи, обеспечивающей необходимый характер успокоения следящей системы прибора, применяют тахометрический мост МТ1-01, который включают в выходную цепь усилителя.

В приборах КСП2 применен линейный реохорд, выполненный в виде отдельного модуля. Нормированное значение сопротивления реохорда $R_{н.\,р}$ принято равным $100 \pm 0{,}1$ Ом.

В приборах КСП2 применяется реверсивный асинхронный двигатель конденсаторного типа РД-09П2.

Для продвижения диаграммной ленты используется однофазный синхронный микродвигатель переменного тока типа ДСМ. В многоточечных приборах этот двигатель используется также для привода переключателя термоэлектрических термометров.

Запись в одноточечных приборах КСП2 произво-

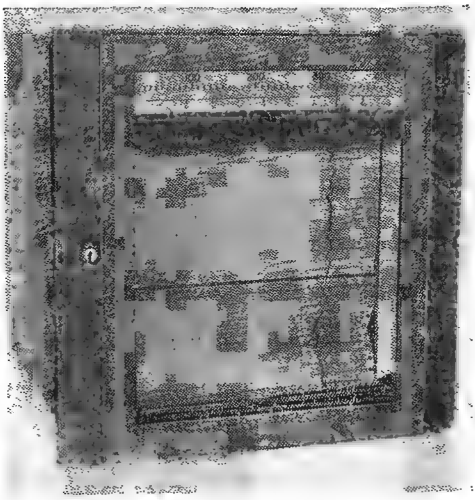


Рис. 4-22-6. Внешний вид автоматического потенциометра типа КСП4.

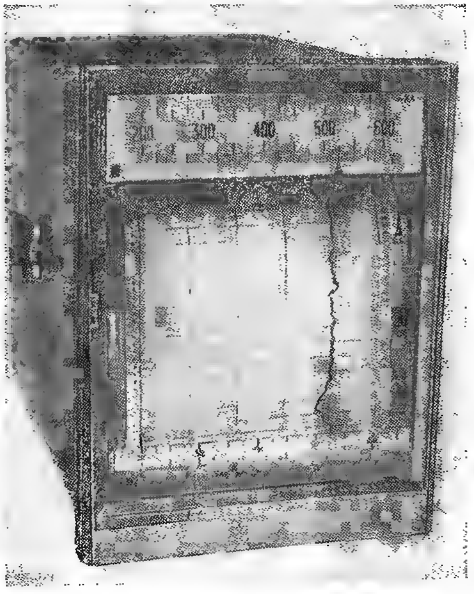


Рис. 4-22-7. Внешний вид автоматического потенциометра типа КСП2.

дится непрерывно с помощью пера, а в многоточечных приборах осуществляется циклично, так же как и в приборах КСП4.

Внешний вид автоматического потенциометра типа КСП2 показан на рис. 4-22-7.

Автоматические миниатюрные потенциометры типа КСП1 являются одноточечными показывающими и самопишущими приборами класса точности 1. Длина шкалы и ширина диаграммной ленты у этих приборов 100 мм. Пределы допускаемой основной погрешности показаний и записи ±1% нормирующего значения измеряемой величины. В зависимости от модификации приборов КСП1 они выпускаются с временем прохождения указателем всей шкалы 2,5 и 10 с.

Измерительная схема приборов КСП1 выполнена аналогично рассмотренным выше. В этих приборах используется полупроводниковый усилитель УПД и реверсивный двигатель типа ДКИР-04 или РД-09П2. Перемещение диаграммной ленты осуществляется синхронным электродвигателем ДСМ-0,2.

Реохорд в приборах КСП1 выполнен в виде отдельного модуля на круглом пластмассовом основании.

Запись на диаграммной ленте в потенциометрах КСП1 осуществляется непрерывно с помощью пера чернилами.

4-23. Автоматические безреохордные потенциометры

Наряду с рассмотренными выше автоматическими потенциометрами, использующими компенсационную измерительную схему с реохордом, выпускаются автоматические безреохордные потенциометры. Работа этих приборов основана на компенсационном принципе измерения э. д. с. или напряжения постоянного тока, осуществляемого автоматически с помощью следящей системы действующей непрерывно. Компенсирующее напряжение, зависящее от угла поворота выходного вала исполнительного механизма следящей системы, вырабатывается бесконтактным устройством.

Упрощенная схема автоматического безреохордного одноточечного потенциометра, выпускаемого харьковским заводом КИП [17], представлена на рис. 4-23-1. Автоматический безреохордный потенциометр содержит *ВУ* — входное устройство усилителя, аналогичное рассмотренным выше; *РД* — реверсивный двигатель; *ПС* — преобразователь со струнным вибратором, выдающий частотный выходной сигнал $f_{\text{вых}}$; *ПЧН* — преобразователь частотного сигнала $f_{\text{вых}}$ в компенсирующее напряжение постоянного тока $U_{\text{к. н}}$.

При равенстве компенсирующего напряжения $U_{\text{к. н}}$, поступающего с *ПЧН*, и измеряемой термо-э. д. с. термометра $E\,(t,\ t_0)$ с допускаемым отклонением, определяемым порогом чувствительности прибора, исполнительный механизм следящей системы потенциометра находится в покое. Если измеряемая термо-э. д. с. $E\,(t,\ t_0)$ не равна компенсирующему напряжению $U_{\text{к. н}}$, то сигнал разбаланса $\Delta U = E\,(t,\ t_0) - U_{\text{к. н}}$ подается на входное устройство *ВУ* усилителя, где преобразуется в напряжение переменного тока и усили-

вается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя. Вал реверсивного двигателя, кинематически связанный с указателем, пером и входной осью преобразователя *ПС*, поворачивает последнюю и одновременно перемещает указатель и перо. Частотный выходной сигнал $f_{вых}$ преобразователя *ПС*, однозначно определяемый углом поворота входной его оси, а следовательно, и положением вала реверсивного двигателя, поступает на вход *ПЧН*, где преобразовывается в напряжение постоянного тока $U_{к.н}$.

Вал реверсивного двигателя поворачивает входную ось преобразователя *ПС* и перемещает указатель с пером до тех пор, пока компенсирующее напряжение $U_{к.н}$ не будет равно измеряемой термо-э. д. с. $E(t, t_0)$.

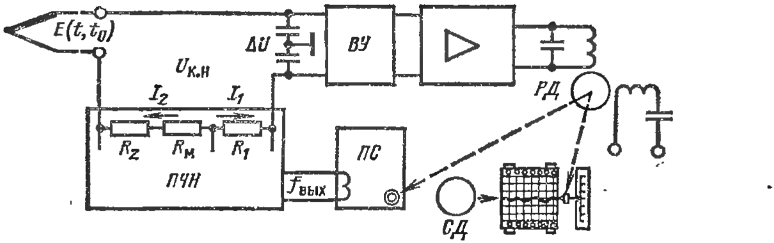


Рис. 4-23-1. Упрощенная схема автоматического безреохордового одноточечного потенциометра типа ЭПС.

Компенсирующее напряжение $U_{к.н}$ равно разности падений напряжения U_1 и U_2 на резисторах R_1, R_2 и $R_м$ соответственно. Резисторы R_1 и R_2 выполнены из манганиновой проволоки, а резистор $R_м$ — из медной. Ток I_1, протекающий через резистор R_1 преобразователя *ПЧН*, а следовательно, и падение напряжения U_1 пропорциональны частотному выходному сигналу $f_{вых}$ преобразователя *ПС*. Измерительная схема питается, так же как и частотомер *ПЧН*, от стабилизированного источника питания, поэтому ток I_2, а следовательно, и падение напряжения U_2 на резисторах R_2 и $R_м$ будут определяться значением медного сопротивления $R_м$, которое изменяется с изменением температуры окружающего воздуха. Это обеспечивает автоматическое введение поправки на изменение термо-э. д. с. термометра, вызываемое изменением температуры его свободных концов. Для обеспечения равенства температур свободных концов термометра и резистора $R_м$ его устанавливают рядом с зажимами, к которым подключают термоэлектродные провода, идущие от термометра.

Подбором резисторов R_1 и R_2 можно получить любую выходную характеристику *ПЧН*, соответствующую заданной градуировке потенциометра для работы в комплекте с термометрами ТХК, ТХА или ТПП. Одновременно подбирается необходимое значение сопротивления резистора $R_м$. При применении потенциометра для

измерения других величин, изменение значения которых может быть преобразовано в напряжение постоянного тока, резистор $R_м$ не ставят.

Автоматические безреохордные потенциометры выпускаются в виде миниатюрных показывающих приборов типа ЭПП и одноточечных показывающих и самопишущих с ленточной диаграммой (ширина поля записи 100 мм) типа ЭПС.

Потенциометры типа ЭПП и ЭПС имеют класс точности 0,5. Пределы допускаемой основной погрешности записи приборов ЭПС ±1% нормирующего значения измеряемой величины. Приборы указанных типов выпускаются с временем прохождения указателем всей шкалы 2,5; 6 или 16 с. Скорость продвижения диаграммной ленты потенциометров ЭПС от 10 до 120 мм/ч. Безреохордные потенциометры могут применяться с внешним сопротивлением до 1000 Ом.

Потенциометры могут быть снабжены следующими дополнительными устройствами: одним или двумя передающими преобразователями типов ПФ, ПС или ПП (гл. 8); сигнализирующим (регулирующим) четырехконтактным устройством, позволяющим осуществлять предварительную и аварийную сигнализацию, двухпозиционное регулирование и другие операции.

Автоматические безреохордные потенциометры применяются в металлургической промышленности. На ТЭС и АЭС они распространения не получили.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ К НИМ

5-1. Общие сведения

Термометры сопротивления широко применяют для измерения температуры в интервале от —260 до 750°С. В отдельных случаях они могут быть использованы для измерения температур до 1000°С.

Действие термометров сопротивления основано на свойстве вещества изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. При измерении температуры термометр сопротивления погружают в среду, температуру которой необходимо определить. Зная зависимость сопротивления термометра от температуры, можно по изменению сопротивления термометра судить о температуре среды, в которой он находится. При этом необходимо иметь в виду, что длина чувствительного элемента у большинства термометров сопротивления составляет несколько сантиметров, и поэтому при наличии температурных градиентов в среде термометром сопротивления измеряют некоторую среднюю температуру тех слоев среды, в которых находится его чувствительный элемент.

Раньше считали, что наиболее подходящим материалом для изготовления термометров сопротивления являются только чистые

металлы. Однако исследования последнего времени показали, что ряд полупроводников так же могут быть использованы в качестве материала для изготовления термометров сопротивления.

Известно, что подавляющее большинство металлов имеет положительный температурный коэффициент электрического сопротивления, достигающий 0,4—0,6% $\cdot ^\circ C^{-1}$ для чистых металлов. Это связывается с тем, что число носителей тока — электронов проводимости — в металлах очень велико и не зависит от температуры. Электрическое сопротивление металла увеличивается с повышением температуры в связи с возрастающим рассеянием электронов на неоднородностях кристаллической решетки, обусловленным увеличением тепловых колебаний ионов около своих положений равновесия. В полупроводниках наблюдается иная картина — число электронов проводимости резко возрастает с увеличением температуры. Поэтому электрическое сопротивление типичных полупроводников столь же резко (обычно по экспоненциальному закону) уменьшается при их нагревании. При этом температурный коэффициент электрического сопротивления полупроводников на порядок выше, чем у чистых металлов.

Термометры сопротивления из чистых металлов, получившие наибольшее распространение, изготовляют обычно в виде обмотки из тонкой проволоки на специальном каркасе из изоляционного материала. Эту обмотку принято называть чувствительным элементом термометра сопротивления. В целях предохранения от возможных механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется термометром, чувствительный элемент его заключают в специальную защитную гильзу.

К числу достоинств металлических термометров сопротивления следует отнести: высокую степень точности измерения температуры; возможность выпуска измерительных приборов к ним с стандартной градуировкой шкалы практически на любой температурный интервал в пределах допустимых температур применения термометра сопротивления; возможность централизации контроля температуры путем присоединения нескольких взаимозаменяемых термометров сопротивления через переключатель к одному измерительному прибору; возможность использования их с информационно-вычислительными машинами.

Полупроводниковые термометры сопротивления, как показывает практика их применения, могут быть использованы для измерения температуры от 1,3 до 400 К. В практике технологического контроля они по сравнению с металлическими находят меньшее применение, так как требуют индивидуальной градуировки. Для точных измерений сопротивления термометров в лабораторных условиях применяют потенциометры и мосты. Тип и класс точности указанных средств измерения выбирают в зависимости от требований к точности измерения сопротивления термометра, а вместе с тем и температуры.

При измерении температуры в промышленных условиях термометры сопротивления применяют в комплекте с логометрами, авто-

матическими уравновешенными мостами и автоматическими компенсационными приборами. При этом необходимо иметь в виду, что эти приборы снабжают шкалой, отградуированной в градусах Цельсия, которая действительна только для определенной градуировки термометра сопротивления и заданного значения сопротивления проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором.

5-2. Основные сведения о термометрах сопротивления и металлах, применяемых для их изготовления

Металлы, предназначенные для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) термометров сопротивления, должны отвечать ряду требований. Они должны не окисляться и обладать высокой воспроизводимостью значений электрического сопротивления в интервале рабочих температур. Выбранный металл в диапазоне применяемых температур должен иметь монотонную зависимость сопротивления от температуры $R = f(t)$ и достаточно высокое значение температурного коэффициента сопротивления α. Этот коэффициент в общем виде может быть выражен равенством:

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dt}. \tag{5-2-1}$$

Температурный коэффициент электрического сопротивления принято определять от 0 до 100°C. Для этого случая выражение (5-2-1) принимает вид:

$$\alpha_{0100} = \frac{R_{100} - R_0}{100}, \tag{5-2-2}$$

где R_0 и R_{100} — сопротивления образца данного металла, измеренные соответственно при 0 и 100°C.

Известно, что сплавы обладают меньшим значением температурного коэффициента сопротивления. Кроме того, воспроизводимость свойств сплавов далеко недостаточна по сравнению с чистыми металлами. Исследования показывают, что чем чище металл (при отсутствии в нем механических напряжений), тем лучше у него воспроизводимость термометрических свойств и больше значения отношения R_{100}/R_0 и α. Поэтому чистые металлы, предназначенные для изготовления взаимозаменяемых ЧЭ термометров сопротивления, должны иметь нормированную и при этом высокую чистоту. Следует указать, что значение R_{100}/R_0, так же как и α, являются общепринятыми показателями степени чистоты данного металла и наличия в нем механических напряжений. Для снятия механических напряжений в данном металле применяют определенные режимы отжига. При этом значение отношения R_{100}/R_0, а следовательно, и температурного коэффициента сопротивления образца возрастают до их предельного значения для данного металла.

Приведенным выше основным требованиям к металлам для изготовления ЧЭ термометров сопротивления в широком интервале тем-

ператур удовлетворяет платина. Если верхний предел температуры применения термометра не высок, то указанным выше требованиям удовлетворяют также медь и никель. В отдельных случаях применяют для изготовления ЧЭ термометров сопротивления, но с ограниченной областью их использования, и другие металлы, например железо, вольфрам и молибден.

Платина и изготовляемые из нее термометры сопротивления. Чистая платина отвечает в наибольшей степени всем основным требованиям, предъявляемым к металлам для изготовления ЧЭ термометров сопротивления. Термометры с ЧЭ из платиновой проволоки диаметром от 0,05 до 0,1 мм применяются в лабораторной и промышленной практике для измерения температуры от —260 до +750°С.

При применении платиновых термометров сопротивления для измерения температуры от —260 до —180°С необходимо иметь в виду, что в этом случае приходится измерять весьма малые сопротивления, особенно в нижней части температурного интервала. Поэтому при измерении низких температур платиновыми термометрами сопротивления необходимо применять в комплекте с ними измерительные приборы, которые позволяют измерять с высокой точностью сотые доли ома.

Платиновые термометры сопротивления в отдельных случаях используются для измерения и более высоких температур, например, в метрологической практике до 1065°С (ГОСТ 8.083-73). При этом необходимо учитывать, что платина при высокой температуре (близкой к 1000°С) начинает распыляться. Поэтому для уменьшения влияния распыления платины, а следовательно, и увеличения срока службы чувствительный элемент термометра сопротивления, предназначенный для измерения температуры до 1100°С, изготовляют из платиновой проволоки диаметром около 0,5 мм.

Чистая платина в окислительной (воздушной) среде устойчива и длительное время сохраняет свои градуировочные данные. Однако такие условия применения платины при измерении температуры в практических условиях не всегда могут быть обеспечены. Поэтому чувствительный элемент термометра должен быть надежно защищен от возможного механического повреждения, попадания влаги, загрязнения платины, губительного действия на нее восстановительных и агрессивных газов, содержащихся в среде, температуру которой измеряют термометром. Более подробно вопрос о возможностях загрязнения платины и губительного действия на нее некоторых газов освещен при рассмотрении платинородий—платиновых термоэлектрических термометров.

К недостаткам платины следует отнести отклонение от линейного закона зависимости ее сопротивления от температуры (рис. 5-2-1). Однако все другие достоинства платины в достаточной степени искупают указанный недостаток и позволяют считать платиновый термометр сопротивления наиболее точным из числа первичных преобразователей, предназначенных для измерения температур в той же области.

Платиновые термометры сопротивления в зависимости от их назначения разделяются на следующие три основные группы: эталонные, образцовые (1-го и 2-го разрядов) и рабочие. Термометры рабочие в свою очередь подразделяются на термометры повышенной точности (лабораторные) и технические.

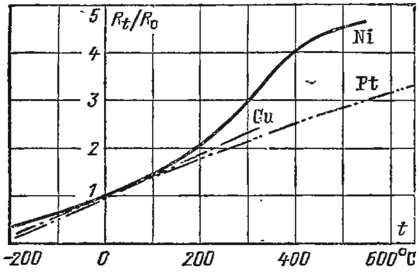


Рис. 5-2-1. Зависимость отношения R_t/R_0 для некоторых металлов от температуры.

Эталонные платиновые термометры сопротивления, как отмечалось выше (гл. 2), служат для воспроизведения международной практической температурной шкалы МПТШ-68 в области температур от 13,81 (—259,34) до 903,89 (630,74) К (° С) (ГОСТ 8.157-75). Относительное сопротивление W_t термометра определяется по формуле

$$W_t = \frac{R_t}{R_0}, \qquad (5\text{-}2\text{-}3)$$

где R_t — сопротивление термометра при температуре t, Ом; R_0 — сопротивление термометра при температуре 0°С (273,15 К), Ом.

Относительное сопротивление термометра должно быть не менее 1,39250 при $t = 100$°С.

Для области от 0 до 630,74°С температуру t в градусах Цельсия рассчитывают по уравнению

$$t = t' + 0{,}045\left(\frac{t'}{100°C}\right)\left(\frac{t'}{100°C} - 1\right)\left(\frac{t'}{419{,}58°C} - 1\right)\left(\frac{t'}{630{,}74°C} - 1\right), \qquad (5\text{-}2\text{-}4)$$

где

$$t' = \frac{1}{\alpha}\,[W(t') - 1] + \delta\left(\frac{t'}{100°C}\right)\left(\frac{t'}{100°C} - 1\right),$$

$$W(t') = \frac{R(t')}{R_0}; \qquad (5\text{-}2\text{-}5)$$

здесь $R(t')$ и R_0 — сопротивления термометра при температуре t' и 0°С соответственно, Ом; α и δ — константы, определяемые измерением сопротивления термометра в тройной точке воды, точке кипения воды или затвердевания олова и точке затвердевания цинка.

Уравнение (5-2-5) эквивалентно уравнению

$$W(t') = 1 + At' + B(t')^2, \qquad (5\text{-}2\text{-}5а)$$

где $A = \alpha(1 + \delta/100°C)$; $B = -10^{-4}\alpha\delta°C^{-2}$.

Для области от 13,81 (—259,34) до 273,15 (0) К (°С) температуру определяют по формуле

$$W_T = W_{ст}(T) + \Delta W(T), \qquad (5\text{-}2\text{-}6)$$

где W_T — относительное сопротивление платинового термометра; $W_{ст}(T)$ — относительное сопротивление, соответствующее стандартной функции (ГОСТ 8.157-75).

Поправки $\Delta W(T)$ при температурах основных реперных точек получают из измеренных значений W_T и соответствующих значений $W_{ст}(T)$, приведенных в ГОСТ 8.157-75. Поправка $\Delta W(T)$ при промежуточных температурах определяют интерполяционными формулами (ГОСТ 8.157-75).

До введения МПТШ-68 применялась шкала МПТШ-48. Чистота платины, из которой изготовляют эталонный термометр для воспроизведения шкалы МПТШ-48 в области от —182,97 до 630,5°С, должна быть такой, чтобы для него соблюдалось отношение сопротивлений $R_{100}/R_0 \geqslant 1{,}392$.

Для интервала от 0 до 630,5° С МПТШ-48 используется интерполяционная формула

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2), \qquad (5\text{-}2\text{-}7)$$

где R_t — сопротивление термометра при температуре t, Ом; R_0 — сопротивление того же термометра при 0° С, Ом.

Для интервала от —182,97 до 0° С применяется уравнение

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)]. \qquad (5\text{-}2\text{-}8)$$

Постоянные A, B и C определяются в точках кипения воды, серы (или в точке затвердевания цинка) и кислорода.

Образцовые платиновые термометры сопротивления 1-го и 2-го разрядов, применяемые от —182,97 до +630,5° С, изготовляют из чистой платины, позволяющей получить для них отношения сопротивлений $R_{100}/R_0 \geqslant 1{,}392$ и $R_{100}/R_0 \geqslant 1{,}391$ соответственно. Образцовые термометры 1-го разряда, поверяемые по рабочим эталонам, применяют для поверки образцовых термометров 2-го разряда, образцовых ртутных термометров, образцовых медь-константановых термоэлектрических термометров и для контроля температуры кипения или затвердевания веществ, применяемых при поверке термометров. Образцовые термометры сопротивления 2-го разряда служат для поверки рабочих термометров.

Значения сопротивлений образцовых термометров 1-го и 2-го разрядов в свидетельствах указываются с количеством значащих цифр, соответствующим точности градуировки.

Платиновые термометры сопротивления повышенной точности, применяемые для точных измерений температуры, изготовляют из той же платины, что и образцовые термометры. В зависимости от требований, предъявляемых к точности измерения температуры, термометры сопротивления повышенной точности поверяются по методике поверки образцовых термометров 1-го или 2-го разрядов.

Для области температур от 13,8 до 273,15 К применяют образцовые платиновые термометры ТСПН-1 (погрешность ±0,01 К), изготовляемые во ВНИИФТРИ. Во ВНИИФТРИ изготовляют также для указанной области температур платиновые термометры повышенной точности ТСПН-2А и ТСПН-Б, различающиеся между собой защитными гильзами, в которых находятся ЧЭ [13].

Для измерения низких температур в области от —260 до +250°С НПО «Термоприбор» изготовляет платиновые термометры повышенной точности типа ТСП-4050 и ТСП-8003, пределы допускаемой погрешности которых ±0,2°С, а также типа ТСП-9003 и ТСП-8004, погрешность которых лежит в пределах от —0,05 до +0,1°С.

Технические платиновые термометры сопротивления типа ТСП, выпускаемые в соответствии с ГОСТ 6651-59, предназначаются для длительного измерения температуры от —200 до 650°С. Термометры сопротивления этого типа изготовляются двух классов (1-го и 2-го) с номинальными значениями сопротивлений при 0°С (R_0), равными 10; 46; 100 Ом, которым присвоено обозначение градуировки соответственно гр20, гр21 и гр22.

Термометры ТСП с начальным сопротивлением $R_0 = 10$ Ом целесообразно применять для измерения температуры выше 200°С. При этом имеется в виду, что термометр сопротивления присоединяется к измерительному прибору по трехпроводной схеме. В тех случаях, когда термометр используется для измерения низких температур (ниже 0°С), рекомендуется применять высокоомные термометры с $R_0 = 46$ Ом, а в некоторых случаях с $R_0 = 100$ Ом. При применении высокоомных термометров при прочих равных условиях изменение показаний измерительного прибора вследствие изменения сопротивления соединительных проводов (при двух- или трех-

проводной схеме включения термометра), под влиянием температуры окружающего воздуха, будет значительно меньше, чем при использовании низкоомных термометров сопротивления.

В целях обеспечения взаимозаменяемости технических термометров типа ТСП установлены допуски на отклонения сопротивления чувствительного элемента термометра при 0°C (R_0) от номинального значения и отношения сопротивлений R_{100}/R_0. Для термометров ТСП класса 1 допустимое отклонение сопротивления чувствительного элемента R_0 от номинального значения не должно превышать ±0,05%, а для термометров класса 2 — ±0,1%. Отношения сопротивлений R_{100}/R_0 установлены равными 1,391 ± 0,0007 для термометров класса 1 и 1,391 ± 0,001 для термометров класса 2. Принятые допуски на основные параметры технических платиновых термометров сопротивления позволили стандартизировать их градуировочные таблицы (см. П5-2-1) и установить максимально допускаемые отклонения значения электрического сопротивления термометров ТСП от данных этих таблиц. Максимально допускаемые отклонения от градуировочных таблиц могут быть вычислены по формулам, приведенным в табл. 5-2-1. В этой таблице t — абсолютное значение температуры чувствительного элемента термометра, °C.

Следует отметить, что значение электрического сопротивления платинового термометра при $0°C \leqslant t \leqslant 650°C$ и $-200°C \leqslant t \leqslant 0°C$, приведенные в градуировочных таблицах (ГОСТ 6651-59), вычислены соответственно по формулам (5-2-7) и (5-2-8). При вычислении значений R_t по этим формулам постоянные коэффициенты принимались равными: $A = 3{,}96847 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}, $B = -5{,}847 \cdot 10^{-7}$ °C^{-2}; $C = -4{,}22 \cdot 10^{-12}$ °C^{-4}. В ближайшее время эти градуировочные таблицы будут уточнены в соответствии с ГОСТ 8.157-75.

Таблица 5-2-1

Максимальные допускаемые отклонения от градуировочных таблиц термометров сопротивления ТСП и ТСМ

Тип термометра	Класс точности	Интервал температуры, °C	Максимальное допускаемое отклонение, Δ_t
ТСП	1	0—650	$\pm(0{,}15 + 3{,}0 \cdot 10^{-3}\, t)$
		0—(—200)	$\pm(0{,}15 + 4{,}5 \cdot 10^{-3}\, t)$
ТСП	2	0—650	$\pm(0{,}30 + 4{,}5 \cdot 10^{-3}\, t)$
		0—(—200)	$\pm(0{,}30 + 6{,}0 \cdot 10^{-3}\, t)$
ТСМ	2	—50—(+180)	$\pm(0{,}30 + 3{,}5 \cdot 10^{-3}\, t)$
ТСМ	3	—50—(+180)	$\pm(0{,}30 + 6{,}0 \cdot 10^{-3}\, t)$

Примечание. Максимальное допускаемое отклонение (Ом)

$$\Delta_R = \pm \frac{\Delta_t (R_{100} - R_0)}{100}.$$

Кроме указанных в табл. 5-2-1 термометров ТСП Луцкий приборостроительный завод изготовляет технические платиновые термо-

метры для температур от —200 до 750°С и от —260 до 750°С типа ТСП-5071 класса точности 2.

Медь и изготовляемые из нее термометры сопротивления. К достоинствам меди, как материала, применяемого для изготовления чувствительных элементов технических термометров сопротивления типа ТСМ, следует отнести дешевизну, простоту получения тонкой проволоки в различной изоляции, возможность получения проводниковой меди высокой чистоты. Температурный коэффициент электрического сопротивления проводниковой меди лежит в пределах от $4{,}2\cdot10^{-3}$ до $4{,}27\cdot10^{-3}$ °С$^{-1}$.

Зависимость электрического сопротивления меди от температуры в широком интервале температур подчиняется уравнению

$$R_t = R_0\,(1+\alpha t), \qquad (5\text{-}2\text{-}9)$$

где R_t и R_0 — сопротивления данного образца меди (чувствительного элемента медного термометра) соответственно при температуре t и 0°С; α — температурный коэффициент электрического сопротивления, характерный для данного образца медной проволоки, из которого изготовлен ЧЭ термометра.

Температурный коэффициент сопротивления α определяют из значений сопротивлений R_0 и R_t чувствительного элемента медного термометра, измеренных соответственно при точке таяния льда и температуре кипения воды. Медная проволока, применяемая для изготовления чувствительных элементов медных термометров ТСМ, имеет температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 4{,}26\cdot10^{-3}$ °С$^{-1}$.

Линейный характер зависимости сопротивления меди от температуры является ее достоинством (рис. 5-2-1). К числу недостатков меди следует отнести малое удельное сопротивление ($\rho = 1{,}7\times\times10^{-8}$ Ом·м) и интенсивную окисляемость при невысоких температурах. В атмосфере инертных газов медь ведет себя устойчиво при более высоких температурах. При установлении верхнего температурного предела применения медного термометра сопротивления необходимо учитывать, какой электрической изоляцией покрыта медная проволока, из которой изготовлен его чувствительный элемент. Термометры сопротивления с ЧЭ, изготовленными из медной проволоки диаметром 0,1 мм, изолированной эмалью, могут быть использованы для длительного измерения температуры не выше 100°С, а из медной проволоки с кремнийорганической или винифлексовой изоляцией — до 180°С.

Медные термометры сопротивления типа ТСМ согласно ГОСТ 6651-59 могут применяться для длительного измерения температуры от —50 до 180°С. По точности они подразделяются на два класса (2 и 3). Номинальные значения сопротивления при 0°С (R_0) для термометров типа ТСМ установлены равными 53 и 100 Ом, которым присвоено обозначение градуировки соответственно гр23 и гр24. Допускаемое отклонение сопротивления ЧЭ термометра R_0 от номинального значения для обоих классов точности составляет $\pm0{,}1\,\%$. Отношение сопротивлений R_{100}/R_0 установлено равным $1{,}426\pm0{,}001$

для термометров класса точности 2 и $1{,}426 \pm 0{,}002$ — для термометров класса точности 3.

Стандартные градуировочные таблицы для медных термометров сопротивления типа ТСМ приведены в табл. П5-2-2. Максимально допускаемые отклонения электрического сопротивления чувствительного элемента термометра ТСМ от данных градуировочных таблиц подсчитываются по формуле, приведенной в табл. 5-2-1.

Из медной проволоки приборостроительная промышленность изготовляет термометры сопротивления типа ТСМ только 3-го класса точности.

Никель и изготовляемые из него термометры сопротивления. Основным достоинством никеля является то, что он обладает высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления ($\alpha = 6{,}66 \cdot 10^{-3}\ {}^\circ C^{-1}$) и большим удельным сопротивлением ($\rho \approx 12{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м). К числу недостатков никеля следует отнести значительную окисляемость при высоких температурах и большую зависимость температурного коэффициента сопротивления от степени чистоты металла. Зависимость сопротивления никеля от температуры имеет резко нелинейную характеристику (рис. 5-2-1).

Вследствие указанных выше причин термометры сопротивления с ЧЭ из никелевой проволоки могут быть использованы для измерения температур не выше 180—200° С.

Никелевые термометры сопротивления применяют за рубежом вместо медных; в СССР они не выпускаются. По данным ВНИИМ для изготовления ЧЭ никелевых термометров сопротивления для температур от —10 до +180°С может быть использована проволока (ГОСТ 2179-59) из никеля марки НПО (ГОСТ 492-52). Электрическое сопротивление термометра с ЧЭ из этой марки никеля в интервале температур $-10 \leqslant t \leqslant 180^\circ$ С может быть вычислено по формуле

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2), \qquad (5\text{-}2\text{-}10)$$

где R_t, R_0 — сопротивление ЧЭ термометра соответственно при температуре t и 0°С, Ом;

$$A = 5{,}86 \cdot 10^{-3}\ {}^\circ C^{-1}; \qquad B = 8 \cdot 10^{-6}\ {}^\circ C^{-2}.$$

Отношение сопротивлений R_{100}/R_0 ЧЭ термометра должно находиться в пределах 1,664—1,668. Максимальное отклонение значения сопротивления ЧЭ термометра при температуре t от данных, вычисленных по формуле (5-2-10), не должно превышать, Ом:

$$\Delta_R = \pm (0{,}3 + 8{,}0 \cdot 10^{-3} t)(R_{100} - R_0)\, 100^{-1}.$$

При этом отклонение сопротивления ЧЭ термометра при 0°С от его номинального значения (например, $R_0 = 100$ Ом) должно быть $\pm 0{,}3 (R_{100} - R_0)\, 100^{-1}$ Ом.

Нагрев термометра сопротивления измерительным током. При измерении температуры термометром сопротивления необходимо иметь в виду возможность его нагрева измерительным током, протекающим по чувствительному элементу. Этот дополнительный нагрев термометра зависит от его конструкции, а также от размера теплового сопротивления, отделяющего ЧЭ термометра от окружающей среды. При этом следует иметь в виду, что размер теплового сопротивления, а вместе с тем и степень дополнительного нагрева термометра зависит от значения коэффициента теплоотдачи на поверхности защитного чехла термометра. Определить расчетным путем оптимальное значение силы измерительного тока, а следовательно, и температуру дополнительного нагрева термометра в боль-

шинстве случаев не представляется возможным. Поэтому размер дополнительного нагрева термометра сопротивления определяют обычно экспериментальным путем в условиях, близких к его применению.

Согласно ГОСТ 6651-59 установившаяся температура нагрева термометра измерительным током, протекающим по ЧЭ, при погружении термометра в тающий лед не должна превышать 0,2°С для термометров типа ТСП и 0,4°С для термометров типа ТСМ при рассеиваемой в термометре мощности, равной 10 мВт. Для термометров с номинальным сопротивлением при 0°С в 10, 46, 53 и 100 Ом такое значение рассеиваемой в термометре мощности соответствует измерительному току 31,6; 14,7; 13,7 и 10 мА соответственно. Обычно ток в измерительных схемах приборов, применяемых в комплекте с термометрами сопротивления, значительно меньше указанных значений.

5-3. Устройство платиновых и медных термометров сопротивления

Опыт эксплуатации термометров сопротивления показывает, что надежная их работа в наибольшей степени определяется механической прочностью конструкции, степенью герметичности и качеством изготовления ЧЭ.

При изготовлении ЧЭ медных термометров сопротивления, обладающих достаточной надежностью и механической прочностью, не встречается затруднений.

При создании же ЧЭ платиновых термометров сопротивления приходится встречаться с рядом трудностей. Материал, выбираемый для изготовления каркаса ЧЭ термометра, должен обладать высокими электрическими изоляционными свойствами, хорошей теплопроводностью и механической прочностью. Кроме того, материал каркаса не должен оказывать вредного влияния на платину. Коэффициент линейного расширения материала каркаса должен быть близким коэффициенту линейного расширения платины. Для изготовления каркасов ЧЭ платиновых термометров сопротивления применяют слюду, плавленый кварц, специальную керамику и другие материалы.

Слюда пригодна для изготовления каркасов ЧЭ платиновых термометров с верхним пределом их применения до 500—650°С. При температуре выше 700°С слюда разбухает, становится хрупкой, а при более высокой температуре из нее выделяется связанная кристаллизационная вода. Кроме того, слюда при температуре около 800°С становится опасной для платины из-за восстановительного действия кремнезема. В силу указанных обстоятельств платиновые термометры с ЧЭ на слюдяном каркасе применяют в промышленных условиях до 400—500°С, а в лабораторной практике до 650°С. В настоящее время в СССР платиновые термометры с ЧЭ на каркасе из слюды не выпускаются, но еще применяются.

Каркасы из кварца широко применяются, так как плавленый кварц химически устойчив, обладает достаточной механической прочностью, высокими электрическими изоляционными свойствами. Он хорошо обрабатывается пламенем горелки с кислородным дутьем. Кварцевые каркасы изготовляют различных форм, например цилиндрические, геликоидальные и других конструкций. Цилиндрические кварцевые каркасы применяют главным образом для изготовления ЧЭ технических платиновых термометров сопротивления. Кварцевые каркасы геликоидальной формы применяют для изготовления ЧЭ эталонных, образцовых и повышенной точности платиновых термометров сопротивления.

Каркасы из специальной керамики, изготовляемой на основе окиси алюминия, применены в новых конструкциях ЧЭ технических платиновых термометров сопротивления, разработанных НПО «Термоприбор». Каркасы из такой керамики обладают высокой механической прочностью, хорошей теплопроводностью и малой газопроницаемостью при температурах 750—1000°С. Кроме того, эта керамика обладает высокими электрическими изоляционными свойствами [18].

Выводные проводники, соединяющие ЧЭ платинового термометра с его зажимами, в зависимости от назначения термометра и диапазона измеряемой температуры выполняют из меди (до 150°С), серебра (до 400°С), золота (до 700°С), платины или специального сплава. При выборе того или иного материала для выводных проводников необходимо учитывать свойство платины реагировать при высоких температурах со многими веществами, находящимися вблизи и особенно в непосредственном контакте с ней. Указанное обстоятельство необходимо также учитывать при пайке выводных проводников к концам платиновой обмотки ЧЭ.

Для термометров сопротивления эталонных, образцовых и повышенной точности выводные проводники применяют только из платиновой проволоки. При этом к каждому концу платиновой обмотки ЧЭ припаивают по два платиновых выводных проводника, из которых два называют токовыми, а два других потенциальными. Наличие четырех выводных проводников дает возможность использовать компенсационный метод измерения сопротивления термометра, описываемый ниже, который позволяет полностью исключить влияние выводных и соединительных проводников на результаты измерения.

Технические термометры сопротивления выпускаются с двумя и четырьмя выводными проводниками, соединяющими ЧЭ термометра с его зажимами. Сопротивление выводных проводников термометров с двумя выводными проводниками при температуре 0°С не должно превышать у платиновых термометров 0,1%, а у медных термометров 0,2% номинальных значений сопротивлений при 0° С.

Чувствительные элементы термометров сопротивления обычно изготовляются с безындукционной намоткой, например бифилярной или сходной с ней по эффекту снижения индуктивности. В этом

случае термометры сопротивления могут работать в комплекте с измерительными приборами, питаемыми как постоянным, так и переменным током.

На рис. 5-3-1 схематично показан платиновый термометр сопротивления П. Г. Стрелкова. У этого термометра каркас ЧЭ, имеющий геликоидальную форму, изготовлен из плавленого кварца. Чувствительный элемент имеет бифилярную обмотку из платиновой проволоки диаметром 0,05—0,1 мм, свернутой в спираль. Снизу петля платиновой спирали закреплена в каркасе. К верхним концам спирали, закрепленным в каркасе, приварены по два выводных проводника из платиновой проволоки диаметром 0,3 мм. Чувствительный элемент помещен в защитную оболочку (гильзу), для изготовления которой применяют плавленый кварц, металл или стекло в зависимости от назначения термометра. Обычно гильза термометра герметична и заполнена сухим гелием, азотом или воздухом при давлении около 0,2 кгс/см^2 (0,02 МПа) в зависимости от назначения и области измеряемых температур. Диаметр d гильзы равен 5—6 мм, а длина ЧЭ $L = 50 \div 100$ мм. Для низких температур обычно применяют короткие платиновые термометры.

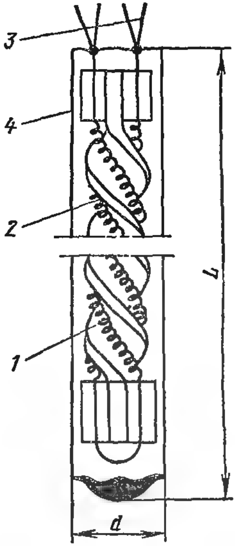


Рис. 5-3-1. Схема устройства платинового термометра сопротивления П. Г. Стрелкова.

1 — каркас; *2* — платиновая спираль; *3* — выводы; *4* — оболочка.

Платиновые термометры сопротивления П. Г. Стрелкова применяют в качестве эталонных, образцовых 1-го и 2-го разрядов и лабораторных (повышенной точности).

Технические термометры сопротивления, предназначенные для измерения температур в промышленных условиях, выпускаются различных типов. Конструкцию защитной гильзы и монтаж в ней ЧЭ термометра выполняют в зависимости от условий его применения, свойства и параметров среды, температура которой должна измеряться термометром.

Из числа выпускаемых в настоящее время технических платиновых термометров сопротивления наибольшее распространение получили термометры, разработанные НПО «Термоприбор», с ЧЭ на каркасе из специальной керамики, изготовляемой на основе окиси алюминия [18]. Эти термометры изготовляют с номинальным сопротивлением R_0 при 0°С 10, 46 и 100 Ом соответственно для градуировок гр20, гр21, гр22. Область применения платиновых термометров с ЧЭ на керамическом каркасе, выпускаемых серийно Луцким приборостроительным заводом, лежит в интервале от —260 до +750°С.

Чувствительный элемент на керамическом каркасе (рис. 5-3-2) состоит из двух или четырех соединенных последовательно плати-

новых спиралей *1*. К двум верхним концам этих спиралей припаяны короткие платиновые выводы *2* или выводы из сплава иридия с родием (60% родия), к которым привариваются необходимой длины выводные проводники и на них надеваются бусы из керамики. Платиновые спирали помещены в каналы керамического каркаса *4*. Крепление платиновых спиралей и выводов в каркасе осуществляется глазурью (или термоцементом) *3*, изготовляемой на основе окисей алюминия и кремния. Коэффициент линейного расширения глазури близок к коэффициентам линейного расширения материала выводов и каркаса. Электрическое сопротивление глазури при 500—700°С составляет около 0,5—1 МОм. Подгонка номинального сопротивления ЧЭ R_0 при 0°С осуществляется постепенным уменьшением длины нижних концов двух платиновых спиралей с последующей пайкой в точке *5* (рис. 5-3-2, *а*).

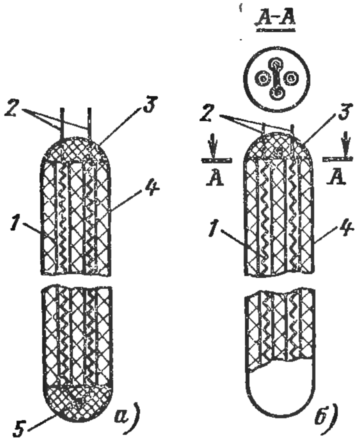


Рис. 5-3-2. Чувствительные элементы платиновых термометров сопротивления на керамическом каркасе с двумя (*а*) и четырьмя каналами (*б*).

Пространство между платиновыми спиралями и стенками каналов каркаса заполнено порошком окиси алюминия, который исключает возможность закорачивания витков спиралей и улучшает тепловой контакт между ними и каркасом.

В четырехканальном каркасе могут быть смонтированы два независимых ЧЭ.

Рассмотренная конструкция ЧЭ платиновых термометров сопротивления на керамическом каркасе имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами. В этой конструкции достигнута достаточно хорошая герметичность при незначительном в платине механическом напряжении. Чувствительный элемент имеет небольшие габариты и обладает высокой механической прочностью.

Для повышения верхнего предела измерения температуры до 1000°С и выше в НПО «Термоприбор» разработаны возможные варианты конструкций технических малоомных термометров сопротивления с ЧЭ из платиновой проволоки диаметром от 0,2 до 0,5 мм [19].

Для измерения низких температур в криогенной технике выпускаются разработанные НПО «Термоприбор» платиновые термометры сопротивления повышенной точности, например типа ТСП-4054 с ЧЭ на четырехканальном керамическом каркасе. В процессе изготовления ЧЭ из каналов керамического каркаса откачивается воздух, а затем они наполняются гелием. Изготовленный

ЧЭ вставляют в защитную металлическую гильзу, герметизация которой со стороны выводов осуществлена с помощью втулки из вакуумно-плотной керамики. Из этой гильзы также откачивается воздух, и она заполняется гелием под небольшим давлением. При таком выполнении термометра обеспечивается хорошая теплоотдача от среды, температура которой измеряется, к ЧЭ. Термометр ТСП-4054 обладает малой инерционностью (показатель тепловой инерции $\varepsilon_{\infty} \approx 2$ с). При измерении температуры от 20°С до точки кипения азота или воздуха погрешность термометра не превышает ±0,01°С [19].

Чувствительный элемент платиновых термометров сопротивления типа ТСП-236 и ТСП-246, предназначенных для измерения температуры подшипников в интервале от 0 до 100°С (гр21), выполняют в виде спирали из платиновой проволоки диаметром 0,05 мм (ТСП-236) и 0,07 мм (ТСП-246). Платиновая спираль, изолированная с двух сторон фторопластовыми прокладками и приклеєная к каркасу, помещена на дно медной гильзы. Медная гильза с ЧЭ вставлена в защитную арматуру из стали 20, на конце которой укреплена малогабаритная головка. Дно медной гильзы ЧЭ припаяно к краям нижней части стальной арматуры. Медные выводы изолированы между собой и от стенки защитной арматуры фарфоровыми изоляторами. Свободные концы выводов подведены к зажимам контактной колодки, находящейся в корпусе головки. На объекте термометр сопротивления крепится с помощью накидной гайки и резиновых прокладок, обеспечивающих плотное прижатие дна медной гильзы к поверхности подшипника.

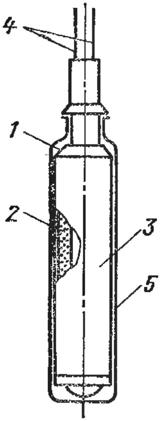


Рис. 5-3-3. Чувствительный элемент медного термометра сопротивления на каркасе из пластмассы.

Показатель тепловой инерции ε_{∞} термометров сопротивления в спокойном воздухе не превышает 7 с для ТСП-236 и 14 с — для ТСП-246. Термометры имеют класс точности 2. Монтажные длины термометров: у ТСП-236 от 20 до 200 мм; у ТСП-246 от 150 до 375 мм.

С устройством других вариантов ЧЭ платиновых лабораторных и технических термометров сопротивления можно ознакомиться в [19].

Чувствительный элемент *1* медного термометра сопротивления типа ТСМ, предназначенного для измерения температуры в пределах от —50 до 180°С, показан на рис. 5-3-3. Он выполнен из изолированной медной проволоки диаметром 0,1 мм многослойной безындукционной намоткой *2* на цилиндрическом каркасе из пластмассы или металла, герметизированной слоем лака *3*. К концам обмотки припаяны выводы из медной проволоки *4*. Собранный ЧЭ вставляют в металлический чехол *5*. Длина ЧЭ термометра равна 40 мм, а диаметр 5—6 мм.

На рис. 5-3-4 показан бескаркасный ЧЭ медного термометра сопротивления типа ТСМ. Чувствительный элемент *1* выполнен из изолированной медной проволоки диаметром 0,08 мм безындукционной бескаркасной намоткой, покрытой фторопластовой пленкой *2*. К концам обмотки припаяны выводы *3* из медной проволоки. С целью обеспечения вибростойкости ЧЭ вставляют в тонкостенный металлический защитный чехол, который засыпается керамическим порошком и герметизируется.

Выпускаемые серийно Луцким приборостроительным заводом медные термометры сопротивления типа ТСМ-5071 предназначены для измерения температуры в области от —50 до +150°C.

Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, ЧЭ технических термометров сопротивления помещают в специальную защитную металлическую арматуру, к которой предъявляются такие же требования, как и к арматуре термоэлектрических термометров (§ 4-8).

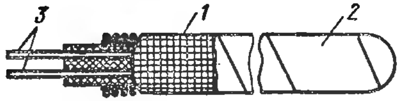


Рис. 5-3-4. Чувствительный элемент медного термометра сопротивления бескаркасный.

По степени инерционности изготовляемые термометры сопротивления подразделяются на термометры с большой ($\varepsilon_\infty = 240$ с), средней ($\varepsilon_\infty = 80$ с) и малой ($\varepsilon_\infty = 9$ с) инерционностью. Для уменьшения инерционности термометра сопротивления необходимо, чтобы материал защитного чехла обладал хорошей теплопроводностью, а рабочая часть термометра имела как можно меньшие массу и воздушную прослойку между чувствительным элементом и внутренними стенками защитной гильзы. Кроме того, чувствительный элемент термометра должен иметь хороший тепловой контакт с внутренней рабочей поверхностью защитной гильзы.

Для серийно выпускаемых платиновых (ТСП-5071) и медных (ТСМ-5071) термометров сопротивления классов точности 2 и 3, применяемых в энергетике и других отраслях промышленности, используется унифицированная защитная арматура (см. рис. 4-8-3). Защитная арматура термометров рассчитана на условные давления 2,5 кгс/см² (0,25 МПа) с гильзой *1* и передвижным штуцером *2*; 64 кгс/см² (6,4 МПа) с гильзой *3* или *4*; 250 кгс/см² (25 МПа) с гильзой *5*; 500 кгс/см² (50 МПа) с гильзой *6* (см. рис. 4-8-3). Такие термометры сопротивления предназначены для измерения температуры газообразных или жидких химически неагрессивных, а также агрессивных сред, не разрушающих защитную арматуру. Платиновые термометры сопротивления ТСП-5071 в зависимости от материала защитной арматуры выпускаются на пределы измерения от —200 до 600°C (гр21 или гр22); от —200 до 750°C (гр22); от —260 до 750°C (гр22). Термометры на пределы измерения от —200 до 600 и —200 до 750°C могут быть снабжены двумя ЧЭ.

В энергетике термометры сопротивления ТСП-5071 могут быть использованы для измерения температуры воздуха перед и за воздухоподогревателем, газов перед воздухоподогревателем и за последней поверхностью нагрева парогенераторов (защитная арматура с гильзой *1* и передвижным штуцером *2*); питательной воды парогенераторов и пара (защитная арматура с гильзой *5* или *6*); мазута и других сред (защитная арматура с гильзой *3* или *4*). Термометры сопротивления ТСМ-5071 могут быть использованы для измерения температуры газообразных и жидких сред до 150°С.

5-4. Полупроводниковые термометры сопротивления

С развитием промышленности, изготовляющей полупроводниковые материалы, были значительно расширены исследования полупроводников с целью установления области их применения в термометрии. Проведенные исследования германия, как материала для чувствительных элементов термометров сопротивления, позволили ВНИИФТРИ создать температурную шкалу в области от 4,2 до 13,81 К для обеспечения единства измерений температуры в этом интервале [13]. В результате проведенных исследований ВНИИФТРИ для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления, предназначенных для измерения температур в криогенной технике, германий получил широкое применение.

В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления применяют также смеси различных полупроводниковых веществ, например, смеси окислов меди и марганца, смеси окислов кобальта и марганца, смеси двуокиси титана с окислами магния и др. При изменении соотношения компонентов, составляющих материал, меняется значение его электропроводности и температурного коэффициента электрического сопротивления.

Полупроводники, применяемые для изготовления чувствительных элементов термометров, а следовательно, и полупроводниковые термометры обладают большим значением отрицательного температурного коэффициента электрического сопротивления, который при 20°С составляет 2—8% · °С$^{-1}$.

Германиевые термометры сопротивления. Германиевые термометры сопротивления (ТСГ) в зависимости от их назначения разделяются на три основные группы: эталонные, образцовые и рабочие. Термометры рабочие в свою очередь подразделяются на термометры повышенной точности (лабораторные) и технические.

Эталонный германиевый термометр сопротивления воспроизводит и хранит единицу температуры и температурную шкалу ТШГТС в диапазоне от 4,2 до 13,81 К (ГОСТ 8.157-75). Зависимость электрического сопротивления R германиевого термометра от температуры T в интервале от 4,2 до 13,81 К выражается соотношением

$$\lg R = \sum_{i=0}^{i=8} A_i (\lg T)^i, \qquad (5\text{-}4\text{-}1)$$

где A_i — константы, определяемые градуировкой германиевого термометра сопротивления по газовому термометру.

По данным ВНИИФТРИ стабильность эталонных германиевых термометров сопротивления лежит в пределах ±0,001 К [13].

На рис. 5-4-1 показано устройство эталонного германиевого термометра сопротивления, разработанного ВНИИФТРИ. Чувствительный элемент *1* термометра выполнен из монокристаллического германия, легированного сурьмой. К раздвоенным концам ЧЭ припаяны четыре золотых проводника, к которым приварены выводы *2* из платиновой проволоки. Чувствительный элемент помещен в защитную гильзу *3*, снабженную стеклянной головкой *4* с впаянными в нее платиновыми выводами. Внутренняя стенка защитной гильзы покрыта электроизоляционной пленкой *5*. Гильза термометра герметична и заполнена газообразным гелием под небольшим давлением.

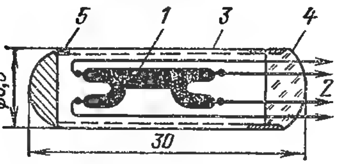


Рис. 5-4-1. Схема устройства германиевого термометра сопротивления.

Термометры сопротивления ТСГ образцовые с ЧЭ из легированного германия могут применяться для измерения низких температур от 1,5 до 30 К. Воспроизводимость образцовых термометров ТСГ-2, изготовленных во ВНИИФТРИ, в интервале от 1,5 до 30 К составляет ±0,001 К. Во ВНИИФТРИ изготовляют также образцовые германиевые термометры ТСГ-1 для области температур от 15 до 20 К. Пределы допускаемой погрешности этих термометров не превышают ±0,01 К [13]. Схемы устройства германиевых термометров образцовых и повышенной точности аналогичны показанной на рис. 5-4-1.

Для технических измерений Институт полупроводников АН УССР (г. Киев) выпускает германиевые термометры сопротивления типа ТСГ-3К для температур от 30 до 90 К и ТСГ-4К для интервала от 30 до 50 К. Пределы допускаемых погрешностей этих термометров сопротивления составляют ±0,05 и ±0,1 К. Кроме этих термометров в институте изготовляют пленочные термометры сопротивления для измерения температур от 4,2 до 300 К и от 1,3 до 100 К.

Терморезисторы — полупроводниковые термометры сопротивления. Для изготовления ЧЭ полупроводниковых термометров ПТС (терморезисторов), используемых для измерения температуры от —100 до 300°С и выше, применяют смеси различных полупроводниковых веществ. Форма и виды изготовляемых ЧЭ весьма разнообразны. Наиболее распространенными видами ЧЭ ПТС являются цилиндрические, шайбовые и бусинковые. Для предохранения от возможных механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется термометром, ЧЭ в зависимости от

его назначений покрывают эмалью, помещают в защитный чехол и снабжают другими защитными устройствами.

Терморезисторы являются малоинерционными термометрами, что имеет существенное значение, например, для исследования нестационарных тепловых процессов. Большое номинальное сопротивление полупроводниковых термометров (от единиц до сотен килоом) позволяет при измерении температуры не учитывать сопротивление проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором. Кроме того, к достоинствам ПТС следует отнести возможность их использования в качестве бесконтактных температурных сигнализаторов (термореле).

К числу недостатков ПТС можно отнести следующее:

1. Отсутствие взаимозаменяемости изготовляемых в настоящее время ПТС. Вследствие этого номинальные значения сопротивлений и температурные коэффициенты даже для одного и того же типа ПТС имеют большой разброс. Это исключает возможность получения единой градуировочной таблицы для данного типа ПТС, и каждый ПТС, предназначенный для измерения или сигнализации температуры, необходимо градуировать индивидуально.

2. Нелинейный характер зависимости электрического сопротивления от температуры.

3. Малая допускаемая мощность рассеяния при прохождении измерительного тока.

Следует отметить, что рассматриваемые ниже полупроводниковые термометры сопротивления для измерения температуры на электростанциях в настоящее время не применяются.

Для выпускаемых ПТС для измерения температуры от —100 до 300°C зависимость сопротивления их от температуры в интервалах, не превышающих 100°C, определяется выражением [20]

$$R_{т} = AT^{b}e^{B/T}, \qquad (5\text{-}4\text{-}2)$$

где $R_{т}$ — сопротивление данного ПТС при температуре T, Ом; T — температура, K; A, b и B — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств материала ЧЭ ПТС и его конструкции; e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2{,}718$).

При применении полупроводниковых термометров в температурных интервалах, не превышающих 25°C, зависимость их сопротивления от температуры может быть выражена упрощенной формулой

$$R_{т} = Ae^{B/T}. \qquad (5\text{-}4\text{-}3)$$

Градуировка ПТС, предназначенных для измерения температуры в интервале более чем 100°C, должна производиться по ряду экспериментальных точек в заданном диапазоне температур через каждые 10°C [20].

Погрешность измерения температуры данной среды с помощью полупроводниковых термометров сопротивления (без учета погрешности измерительного прибора) зависит в основном от нестабиль-

ности его сопротивления, погрешности градуировки, погрешности от перегрева и условий измерения температуры данной среды. Нестабильность ПТС является основным фактором, определяющим погрешность измерения температуры. Критерием нестабильности ПТС принято считать изменение значения сопротивления (в процентах) после выдержки при максимальной по абсолютному значению рабочей температуре применения данного типа ПТС в течение 200 ч.

Нестабильность ПТС, выпускаемых промышленностью для измерения температуры, достигает 0,5—1%. Нестабильность может быть значительно уменьшена путем специального отбора и продолжительного старения ПТС при их изготовлении. При правильно выбранном режиме старения погрешность измерения температуры из-за нестабильности ПТС может быть незначительной и лежать в пределах от 0,1 до 0,3%. Погрешность индивидуальной градуировки стабилизированных ПТС, выполняемой в соответствии с методическими указаниями ВНИИМ [20], может быть доведена до 0,1—0,01°С.

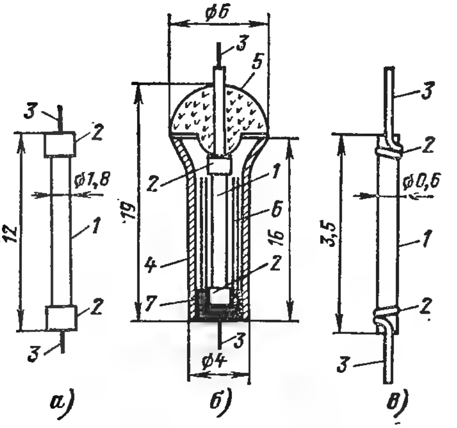


Рис. 5-4-2. Терморезисторы.

а — типа ММТ-1 и КМТ-1; *б* — типа ММТ-4 и КМТ-4; *в* — типа КМТ-11; *1* — чувствительный элемент, покрытый эмалью; *2* — контактные колпачки; *3* — выводы; *4* — металлический чехол; *5* — стекло; *6* — металлическая фольга; *7* — слой олова.

Измерительный ток, протекающий через ПТС, должен выбираться таким, чтобы погрешность от перегрева ЧЭ термометра за счет выделения в нем мощности рассеяния не превышала половины допускаемой погрешности измерения температуры. Допускаемая погрешность измерения температуры с помощью ПТС устанавливается равной значению нестабильности, указанному в паспорте на ПТС заводом-изготовителем. Устройство некоторых типов полупроводниковых чувствительных элементов ПТС показано на рис. 5-4-2. В табл. 5-4-1 приведены основные характеристики полупроводниковых ПТС. С характеристиками других типов терморезисторов, выпускаемых промышленностью, можно познакомиться в [21, 22].

При использовании нескольких однотипных ПТС в комплекте с одним измерительным прибором, шкала которого отградуирована в градусах Цельсия, важное значение приобретает унификация их характеристик. Для обеспечения взаимозаменяемости применяют схему, образованную из ПТС (R_T) и постоянных манганиновых резисторов $R_ш$ и $R_п$, соединенных параллельно и последовательно

Основные характеристики ЧЭ полупроводниковых термометров сопротивления

Тип ЧЭ	Номинальное сопротивление при 20°С, кОм	Постоянная В·10², К	Рабочие температуры, °С	Коэффициент рассеяния, мВт/К	Постоянная времени (не более), с
ММТ-1	1—220	20,6—43	—60 ÷ +125	5	85
ММТ-4	1—220	20,6—43	—60 ÷ +125	6	115
КМТ-1	22—1000	36—72	—60 ÷ +180	5	85
КМТ-11	100—3300	⩾36	0—125	0,8	10
КМТ-14	0,51—7500	41—70	—10 ÷ +300	0,8	60
КМТ-10	100—3300	⩾36	0—125	—	—

Примечание. Номинальное сопротивление терморезистора КМТ-14 нормируется при 150°С.

с R_T (рис. 5-4-3). Такая схема или подобная ей позволяет с достаточной точностью совместить температурные характеристики ПТС одного и того же типа в двух точках шкалы.

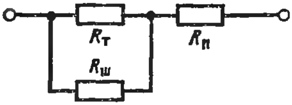


Рис. 5-4-3. Схема, обеспечивающая взаимозаменяемость ПТС.

Полупроводниковые термометры сопротивления нашли также применение в системах температурной сигнализации. Обязательным элементом этой системы является элементарная цепь, состоящая из ПТС и постоянного резистора, включенного последовательно.

Полупроводниковые термометры сопротивления, предназначенные для работы в системе температурной сигнализации, должны обладать возможно большим температурным коэффициентом сопротивления и, следовательно, постоянной B. Чем выше температурный коэффициент сопротивления или постоянная B, тем больше крутизна падающего участка вольт-амперной характеристики ПТС (рис. 5-4-4), что обеспечивает лучшие условия срабатывания схемы температурной сигнализации. Форма вольт-амперной характеристики ПТС в сильной степени зависит от его температуры. На зависимости формы этой характеристики от температуры основано явление релейного эффекта и применение ПТС в системе температурной сигнализации. Под релейным эффектом понимают резкое возрастание силы тока в цепи, состоящей из ПТС и последовательно соединенного

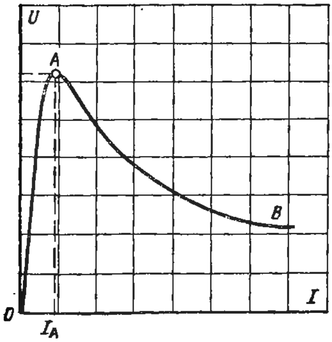


Рис. 5-4-4. Статическая вольт-амперная характеристика ПТС.

с ним манганинового резистора, вызываемое увеличением температуры среды, окружающей ПТС, и, следовательно, уменьшением значения его сопротивления. Следует отметить, что условия, при которых в цепи возникает релейный эффект, не ограничиваются только изменением температуры среды, в которой находится ПТС, и, вообще говоря, весьма разнообразны [23, 24].

5-5. Компенсационный метод измерения сопротивления термометра

Компенсационный метод измерения сопротивлений широко применяется при точных измерениях температуры лабораторными термометрами сопротивления, а также при их градуировке. Применяемые в этом случае термометры сопротивления должны иметь четыре выводных проводника. Два из них обычно называют токовыми, а два других — потенциальными. При применении таких термометров рассматриваемый метод измерения сопротивления позволяет полностью исключить влияние сопротивления соединительных проводников на результаты измерения, так как измерения производятся без потребления тока. Компенсационный метод измерения сопротивлений используется также для измерения сопротивления пирометрических милливольтметров и в ряде других случаев.

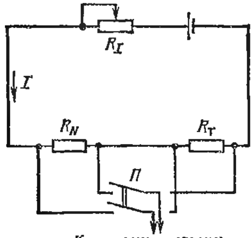


Рис. 5-5-1. Схема измерения сопротивления термометра компенсационным методом.

Схема измерения сопротивлений компенсационным методом показана на рис. 5-5-1. Как видно из приведенной схемы, термометр сопротивления $R_т$ включен последовательно с образцовым резистором R_N в цепь источника постоянного тока. В качестве резистора R_N обычно применяют образцовую катушку сопротивления класса 0,01. При использовании лабораторного термометра сопротивления второго разряда можно применять образцовую катушку сопротивления класса 0,02. В некоторых случаях, например при измерении сопротивления пирометрического милливольтметра, в качестве образцового резистора R_N пользуются магазином сопротивления соответствующего класса точности. Измерительный ток в схеме устанавливается с помощью реостата R_I, а контролируется по падению напряжения на образцовом резисторе R_N посредством лабораторного потенциометра. Необходимое значение измерительного тока должно выбираться таким, чтобы при измерении температуры не вызывать заметного нагрева чувствительного элемента термометра сопротивления выделяющимся джоулевым теплом.

Потенциальные проводники от термометра сопротивления и образцовой катушки присоединены к переключателю $П$, с помощью которого лабораторный потенциометр может быть поочередно подключен для измерения падения напряжения на образцовой катушке

сопротивления U_N и на чувствительном элементе термометра $U_т$. Если через I обозначить силу тока в цепи, то

$$U_N = IR_N,\ U_т = IR_т,$$

откуда

$$R_т = \frac{U_т}{U_N} R_N. \qquad (5\text{-}5\text{-}1)$$

Измерительный ток, проходящий через лабораторный термометр сопротивления, имеет значение около 2 мА, а $U_т$ и U_N не превышают нескольких десятков милливольт. Поэтому для измерения $U_т$ и U_N применяют низкоомные лабораторные потенциометры класса 0,01 и 0,02.

Точность измерения сопротивления термометра, а вместе с тем и температуры компенсационным методом, зависит от точности применяемых технических средств и условий измерения.

5-6. Измерение сопротивления термометра мостом

Сопротивление термометра с помощью моста можно измерить нулевым методом или методом отклонения. Ниже рассмотрим эти методы измерения сопротивления термометра.

Измерение сопротивления термометра уравновешенным мостом. Уравновешенные четырехплечие мосты являются наиболее распространенными приборами для измерения сопротивления термометра нулевым методом как при градуировке термометра, так и при измерениях температуры в лабораторных условиях. Вообще же уравновешенные мосты находят широкое применение в лабораторных условиях для измерения сопротивлений от 0,5 до 10^7 Ом. Для измерения малых сопротивлений применяют двойные мосты или компенсационный метод измерения.

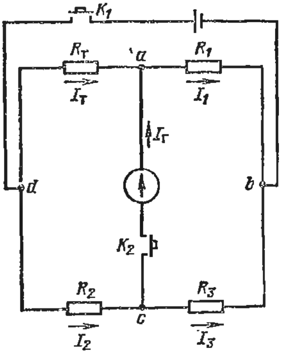


Рис. 5-6-1. Схема уравновешенного моста.

Принципиальная схема уравновешенного моста с включенным термометром сопротивления $R_т$ изображена на рис. 5-6-1, где R_1, R_2 и R_3 — резисторы с известными сопротивлениями. Один из них, например R_1, является сравнительным регулируемым плечом. В одну из диагоналей моста (точки b и d) включен источник питания. Во вторую (точки a и c) — чувствительный нулевой гальванометр.

Изменяя значение сопротивления сравнительного плеча, всегда можно добиться такого состояния схемы, при котором потенциалы точек a и c, а следовательно, и ток в нулевом приборе, равны нулю. Такое состояние обычно называют состоянием равновесия схемы. Равновесие схемы может быть достигнуто только при определенном

соотношении между сопротивлениями плеч моста. Действительно, если мост уравновешен, т. е. $I_г = 0$, то $I_т = I_1$ и $I_2 = I_3$ и падения напряжений на $R_т$ и R_2, а также и на R_1 и R_3 будут равны

$$I_т R_т = I_2 R_2;$$

$$I_1 R_1 = I_3 R_3;$$

отсюда получаем следующее соотношение:

$$\frac{R_т}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}, \tag{5-6-1}$$

или

$$R_т = \frac{R_2}{R_3} R_1. \tag{5-6-2}$$

Из уравнения (5-6-2) видно, что уравновесить мост можно подбором сопротивления резистора R_1 при постоянном отношении балансных плеч R_2/R_3. Следовательно, каждому значению сопротивления термометра соответствует вполне определенное значение сопротивления сравнительного плеча R_1 при постоянно выбранном отношении плеч R_2/R_3.

При измерении сопротивления $R_т$ работа на мосте сводится к следующему. Если значение измеряемого сопротивления неизвестно, то, задавшись отношением балансных плеч моста R_2/R_3, равным единице, вводят на сравнительном плече R_1 наименьшее сопротивление и, замкнув на мгновение кнопки K_1 и K_2, замечают, в какую сторону отклоняется стрелка нулевого гальванометра. Затем на сравнительном плече вводят наибольшее сопротивление, вновь на короткий период замыкают кнопки и замечают сторону отклонения. Если это отклонение противоположно первому, то остается только подобрать такое R_1, при котором повторные замыкания и размыкания кнопок не вызовут колебаний стрелки нулевого гальванометра. Если же отклонения происходят в одну и ту же сторону, то надо изменить взятое ранее отношение балансных плеч и повторить опыт.

После того как измеряемое сопротивление приблизительно определено, подбирают такое значение отношения балансных плеч моста, которое гарантировало бы его максимальную чувствительность, и вновь производят измерение.

Если подразделения резистора R_1 недостаточно малы и полного равновесия достичь нельзя, то прибегают к одному из следующих способов:

1. Интерполируют, т. е. определяют, те ближайшие к действительному R_1 значения R_1' и R_1'', при которых указатель нулевого гальванометра дает отклонения α_1 и α_2 в противоположные стороны от нулевой отметки его шкалы. Если при этом R_1' отвечает угол отклонения α_1, а R_1'' — угол отклонения α_2, то, следовательно, разности $R_1'' - R_1'$ соответствует общий размах стрелки прибора в $\alpha_1 + \alpha_2$ делений шкалы.

Таким образом, на одно деление шкалы приходится

$$\frac{R_1''-R_1'}{\alpha_1+\alpha_2}.$$

Тогда действительное сопротивление термометра

$$R_т=\frac{R_2}{R_3}\left(R_1'+\frac{R_1''-R_1'}{\alpha_1+\alpha_2}\alpha_1\right), \tag{5-6-3}$$

если

$$R_1'<R_1,$$

или

$$R_т=\frac{R_2}{R_3}\left(R_1''-\frac{R_1''-R_1'}{\alpha_1+\alpha_2}\alpha_2\right), \tag{5-6-4}$$

если

$$R_1''>R_1.$$

2. Шунтируют резистор R_1 таким резистором R, при котором мост уравновешивается, тогда

$$R_т=\frac{R_2}{R_3}\frac{R_1R}{R_1+R}. \tag{5-6-5}$$

Замыкание цепей схемы во избежание вредного влияния самоиндукции (экстратоков размыкания) надо вести в такой последовательности: сначала замкнуть кнопку источника питания K_1, а затем нулевого прибора K_2; размыкание же их следует производить в обратном порядке.

Следует указать, что $R_т$, определенное указанным выше способом, является сопротивлением всего плеча моста ad. Оно состоит не только из сопротивления термометра, подлежащего изменению, но и из сопротивления соединительных проводов, с помощью которых термометр подключен к зажимам a и d и включает сопротивления контактов между этими точками. Поэтому определение температуры по измеренному сопротивлению термометра без учета сопротивлений соединительных проводов может сопровождаться значительной дополнительной погрешностью.

Измерение сопротивления термометра неуравновешенным мостом. Неуравновешенные мосты, применяемые для технических измерений температуры с помощью термометра сопротивления, имеют то преимущество перед уравновешенными мостами, что позволяют получать отсчеты показаний по шкале прибора без уравновешивания моста. Неуравновешенные мостовые измерительные схемы используются в измерительных преобразователях (гл. 8) для преобразования сопротивления термометра в напряжение, а также для других целей, рассматриваемых ниже.

На рис. 5-6-2 показана принципиальная схема неуравновешенного моста. Здесь R_1, R_2 и R_3 — постоянные резисторы плеч моста; $R_т$ — сопротивление термометра; mV — милливольтметр с внутренним сопротивлением $R_м$; $R_к$ — контрольный резистор; $П$ — пере-

ключатель, позволяющий включать либо термометр сопротивления (положение *И*), либо контрольный резистор (положение *К*). Если при положении *И* переключателя *П* сопротивление термометра изменится, то через милливольтметр, включенный в измерительную диагональ моста, потечет ток и указатель его отклонится. Угол отклонения указателя милливольтметра, а следовательно, и сила тока будут тем больше, чем значительнее нарушено равновесие моста. Таким образом, устанавливается известная зависимость между отклонением указателя милливольтметра и сопрогивлением термометра, позволяющая судить о температуре термометра, а следовательно, и о температуре среды, в которой он находится.

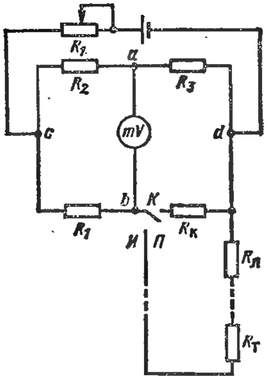


Рис. 5-6-2. Схема неуравновешенного моста.

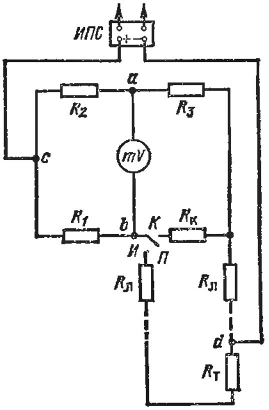


Рис. 5-6-3. Схема неуравновешенного моста с термометром, включенным по трехпроводной схеме.

Сила тока, протекающего через милливольтметр, выражается следующим уравнением:

$$I_м = U_{cd}\frac{R_1R_3 - R_2R_т}{Д}, \qquad (5\text{-}6\text{-}6)$$

где $Д = R_м(R_1 + R_т)(R_2 + R_3) + R_2R_3(R_1 + R_т) + R_1R_т(R_2 + R_3)$.

Из этого выражения видно, что ток, протекающий через милливольтметр, пропорционален напряжению U_{cd} на вершинах моста *a* и *b*. Вследствие этого для обеспечения правильности показаний прибора необходимо применять стабилизированный источник питания или поддерживать постоянное напряжение в точках *c* и *d*; для этой цели служит регулировочный резистор R_I, выполненный в виде реостата. Для обеспечения контроля напряжения предусматривается постоянный, не зависящий от температуры контрольный резистор $R_к$, включаемый в схему моста вместо термометра сопротивления с помощью переключателя *П*. Резистор $R_к$ обычно имеет

сопротивление, равное сопротивлению термометра, соответствующему двум третям шкалы прибора и соединительных проводов. При включении $R_к$ указатель милливольтметра должен встать на контрольную отметку. Если напряжение U_{cd} мало, то указатель прибора не дойдет до контрольной отметки, а если велико, то указатель ее перейдет. Для установления надлежащего значения U_{cd}, как упоминалось выше, пользуются реостатом R_I.

В настоящее время для питания неуравновешенных мостовых измерительных схем применяют стабилизированные источники питания (ИПС). Для уменьшения погрешности вследствие изменения с температурой сопротивления проводов, соединяющих термометр с мостом, применяют трехпроводную схему включения термометра в мост, показанную на рис. 5-6-3. Здесь $R_л$ — манганиновые катушки для подгонки сопротивления линии до заданного значения. Остальные обозначения соответствуют принятым выше. В этой схеме переключатель $П$ и резистор $R_к$ служат для контроля исправности моста.

5-7. Логометры

Рассматриваемые ниже приборы магнитоэлектрической системы, называемые логометрами (от греческого слова «логос» — отношение), широко используются в практике технологического контроля для измерения и записи температуры в комплекте с термометрами сопротивления. Кроме того, логометры могут быть использованы для измерения, записи и регулирования или сигнализации температуры. В этом случае они должны быть снабжены дополнительным регулирующим или сигнальным устройством. Логометры выпускаются обычно с градуировкой шкалы в градусах Цельсия. При этом необходимо иметь в виду, что температурная их шкала действительна только для определенной градуировки термометра сопротивления и заданного значения сопротивления внешних соединительных линий. Логометры находят также применение для измерения других величин, изменение значения которых может быть преобразовано в изменение активного электрического сопротивления.

Измерительный механизм логометров состоит из двух рамок, помещенных в воздушный зазор между полюсами постоянного магнита и сердечником. При этом в отличие от пирометрических милливольтметров у логометров воздушный зазор между полюсами магнита и сердечником сделан неравномерным и соответственно непостоянна магнитная индукция в зазоре. Противодействующий момент у логометров создается, как и вращающий электрическим путем одной из его рамок, что является характерной особенностью этих приборов. Поэтому токопроводы к рамкам логометра по возможности не должны создавать механического противодействующего момента, чтобы не оказывать влияния на положение равновесия, обусловленное вращающими моментами двух рамок.

Принципиальная схема логометра с внешним постоянным магнитом показана на рис. 5-7-1. В междуполюсном пространстве постоянного магнита NS на общей оси (двух кернах) укреплены две скрещенные и жестко связанные между собой рамки $R_р$ и $R'_р$, изготовленные из тонкой изолированной медной проволоки. Эти рамки могут свободно поворачиваться в пределах рабочего угла в воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником цилиндрической формы, закрепленным, как и полюсные наконечники, неподвижно. Выточки полюсных наконечников сделаны также по окружности, но радиус этих выточек смещен по отношению к центру сердечника так, что воздушный зазор убывает от центра полюсных наконечников к их краям, а магнитная индукция возрастает приблизительно по квадратичному закону от центра к краям полюсных наконечников. В приборах с таким измерительным механизмом при угле между рамками от 15 до 20° можно получить почти пропорциональную шкалу с центральным углом около 80—90°.

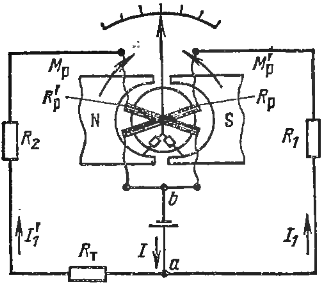


Рис. 5-7-1. Принципиальная схема логометра с внешним постоянным магнитом.

Рамки логометра включены таким образом, что их вращающие моменты $M_р$ и $M'_р$ направлены навстречу друг другу. Подвод тока к рамкам производится либо с помощью «безмоментных» вводов, сделанных из золотых ленточек, либо посредством маломоментных спиральных волосков, изготовляемых из бронзовых сплавов. На приведенной схеме логометра R_1 и R_2 — добавочные манганиновые резисторы, а $R_т$ — сопротивление термометра.

Как видно из рис. 5-7-1, ток от источника питания в точке a разветвляется и проходит по двум ветвям: через резистор R_1, рамку $R_р$ и через термометр сопротивления $R_т$, резистор R_2 и рамку $R'_р$. В точке b ветви сходятся, и дальше ток идет по одному проводнику до источника питания. При протекании по рамкам $R_р$ и $R'_р$ токов I_1 и I'_1 создаются магнитные поля, в результате взаимодействия которых с полем постоянного магнита возникают вращающие моменты соответственно $M_р$ и $M'_р$, направленные навстречу друг другу. Если $R_1 + R_р = R_2 + R'_р + R_т$, то $I_1 = I'_1$ и при симметричном расположении рамок $R_р$ и $R'_р$ относительно полюсных наконечников вращающие моменты $M_р$ и $M'_р$ равны (рамки занимают положение, показанное на рис. 5-7-1).

Если сопротивление $R_т$ вследствие нагрева термометра возрастает, то вращающий момент рамки $R_р$ будет больше момента рамки $R'_р$, так как $I_1 > I'_1$, и подвижная часть начнет поворачиваться по часовой стрелке, т. е. в направлении момента $M_р$. При этом рамка $R_р$ с большим вращающим моментом попадает в более слабое магнитное поле и ее момент уменьшается, момент же рамки $R'_р$,

наоборот, будет увеличиваться. При определенном угле поворота вращающие моменты сравняются и рамки остановятся. Это произойдет при условии

$$M_{р} = M'_{р}$$

или

$$s_1 n_1 B_1 I_1 = s'_1 n'_1 B'_1 I'_1, \qquad (5\text{-}7\text{-}1)$$

где B_1 и B'_1 — магнитная индукция в зонах расположения рамок $R_{р}$ и $R'_{р}$, Т; n_1 и n'_1 — число витков рамок $R_{р}$ и $R'_{р}$; s_1 и s'_1 — площадь активной части рамок $R_{р}$ и $R'_{р}$, м^2.

Полагая в уравнении (5-7-1), что

$$s_1 n_1 = s'_1 n'_1,$$

получаем

$$B_1 I_1 = B'_1 I'_1,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I'_1} = \frac{B'_1}{B_1}. \qquad (5\text{-}7\text{-}2)$$

Учитывая, что значение отношения B'_1/B_1 является функцией угла φ отклонения подвижной части, уравнение (5-7-2) можно представить в виде

$$\frac{I_1}{I'_1} = f(\varphi) \qquad (5\text{-}7\text{-}3)$$

или

$$\varphi = F\left(\frac{I_1}{I'_1}\right). \qquad (5\text{-}7\text{-}4)$$

Подставив в уравнение (5-7-4) значения

$$I_1 = \frac{U}{R_{р} + R_1} \quad \text{и} \quad I'_1 = \frac{U}{R'_{р} + R_2 + R_{т}},$$

получим:

$$\varphi = F\left(\frac{R'_{р} + R_2 + R_{т}}{R_{р} + R_1}\right).$$

Так как $R_{р}$, $R'_{р}$, R_1 и R_2 являются постоянными величинами, то

$$\varphi = F\left(\frac{I_1}{I'_1}\right) = F(R_{т}), \qquad (5\text{-}7\text{-}5)$$

т. е. угол отклонения подвижной части или указателя логометра является функцией измеряемого сопротивления термометра.

При выводе уравнения (5-7-5) не учитывались моменты, накладываемые токоподводящими вводами, и трение. Если учесть эти моменты, трение и другие факторы, то изменения значения напряжения U источника питания более чем на ± 15—20% номинального вызывает изменение показаний логометра.

В приборах с «безмоментными» вводами при выключенном напряжении питания указатель может оставаться в любом месте шкалы и тем самым ввести в заблуждение при измерениях. Поэтому в показывающих логометрах ставят специальный электромагнитный возвратитель, благодаря которому указатель смещается только в том случае, когда к прибору подведено напряжение.

В логометрах, выпускаемых в настоящее время, подвод тока к рамкам осуществляется с помощью маломоментных спиральных волосков, которые одновременно служат и для возвращения стрелки в исходное положение при выключенном источнике питания. В этом случае изменение напряжения питания на $\pm 10\%$ номинального (4 В) вызывает изменение показаний, обычно не превышающее предела допускаемой основной погрешности логомера. Для повышения точности измерения с помощью логометра желательно применять для питания его стабилизированный источник напряжения.

Основным недостатком рассмотренной дифференциальной логометрической схемы, применяемой в комплекте с высокоомными термометрами, является то, что для уменьшения температурной погрешности прибора приходится включать последовательно с рамками манганиновые резисторы с большими сопротивлениями R_1 и R_2. Вследствие этого логометры с такой измерительной цепью обладают меньшей чувствительностью по сопротивлению по сравнению с приборами с мостовыми логометрическими схемами. Применяемые мостовые схемы с логометром в качестве измерителя можно разделить на две основные группы, а именно несимметричные и симметричные. Логометры с несимметричной мостовой цепью не нашли широкого применения и ниже рассматриваться не будут.

В принципиальной схеме логометра с симметричной мостовой цепью, получившего широкое применение (рис. 5-7-2), сопротивления резисторов симметричных плеч моста равны между собой, т. е. $R_2 = R_3$, а $R_1 = R_т$ при сопротивлении $R_т$ термометра, примерно равном среднему значению измеряемой температуре по шкале логометра. Если $R_1 = R_т$, то потенциалы точек c и d одинаковы (благодаря симметрии схемы), а токи $I_р$ и $I'_р$, протекающие в рамках $R_р$ и $R'_р$, равны и противоположны. При увеличении сопротивления $R_т$ термометра потенциал точки c понижается, а потенциал точки d повышается. Соответственно ток $I'_р$ уменьшается, а ток $I_р$ увеличивается. Когда сопротивление термометра уменьшается, ток $I'_р$ увеличивается, а ток $I_р$ уменьшается. Таким образом, при изменении сопротивления термометра происходит одновременное изменение токов в обеих рамках логометра. Изменения этих токов имеют разные знаки, благодаря этому чувствительность такой схемы выше, чем у несимметричной схемы.

На рис. 5-7-3 схематично показаны два варианта конструкций измерительных механизмов логометра, применяемых с симметричной мостовой цепью. В механизме, показанном на рис. 5-7-3, a, воздушный зазор убывает, а магнитная индукция возрастает по квадратичному закону от центра к краям полюсных наконечников.

В измерительном механизме, выполненном по схеме рис. 5-7-3, *б*, воздушный зазор увеличивается от центра полюсных наконечников к их краям, а магнитная индукция падает примерно по квадратичному закону от центра к краям полюсных наконечников. Оба варианта практически равнозначны и позволяют получить близкую к линейной шкалу с центральным углом 80—90° (при угле между рамками 15—20°). Наряду с измерительными механизмами с внешним магнитом (рис. 5-7-3) получают широкое распространение малогабаритные механизмы с внутрирамочным магнитом. По конструкции они подобны измерительным механизмам с внутрирамочным

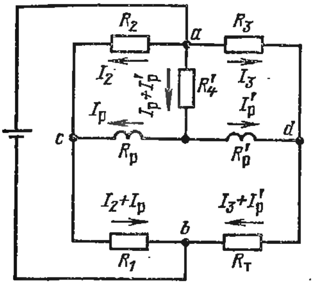


Рис. 5-7-2. Принципиальная схема логометра с симметричной мостовой цепью.

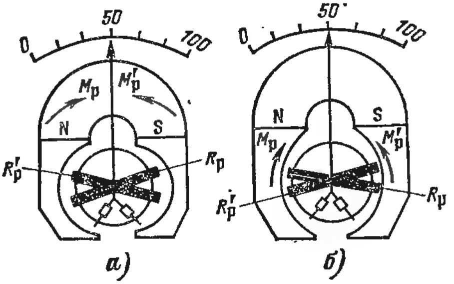


Рис. 5-7-3. Измерительные механизмы логометров с внешним постоянным магнитом.

магнитом милливольтметров (гл. 4), но отличаются наличием двух рамок, малой жесткостью спиральных волосков и неравномерным распределением магнитной индукции в воздушном зазоре.

Время успокоения подвижной части применяемых логометров с рассмотренными или другими измерительными механизмами не должно превышать 3 с при длине шкалы до 90 мм, 4 с при длине шкалы от 90 до 150 мм и 6 с при длине шкалы более 150 мм.

Определим значения токов I_p и I'_p в рамках логометра (рис. 5-7-2). Для рассматриваемой схемы прибора с учетом, что $R_2 = R_3 = R$ и $R_p = R'_p$, можно написать следующие уравнения:

$$\left.\begin{aligned} U &= (I_2+I_p)\,R_1 + I_2R = I_2\,(R_1+R) + I_pR_1; \\ U &= (I_3+I'_p)\,R_т + I_3R = I_3\,(R_т+R) + I'_pR_т; \\ U &= (I_2+I_p)\,R_1 + I_pR_p + (I_p+I'_p)\,R'_4; \\ U &= (I_3+I'_p)\,R_т + I'_pR_p + (I_p+I'_p)\,R'_4. \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}7\text{-}6)$$

Решая совместно эти уравнения относительно I_p и I'_p, получаем:

$$I_p = \frac{UR\,(R_pR_т + R'_4R_т + R_pR + R_тR - R'_4R_1)}{A\,[R_т\,(R+R_p+R'_4) + R\,(R_p+R'_4)] - (R'_4)^2\,(R_т+R)\,(R_1+R)}; \qquad (5\text{-}7\text{-}7)$$

$$I'_p = \frac{UR\,(R_pR_1 + R'_4R_1 + R_pR + R_1R - R'_4R_т)}{A\,[R_т\,(R+R_p+R'_4) + R\,(R_p+R'_4)] - (R'_4)^2\,(R_т+R)\,(R_1+R)}, \qquad (5\text{-}7\text{-}8)$$

где

$$A=R_1(R+R_p+R'_4)+R(R_p+R'_4).$$

Разделив уравнение (5-7-7) на (5-7-8), получаем выражение для отношения токов в рамках логометра

$$\frac{I_p}{I'_p}=\frac{R_pR_т+R'_4R_т+R_pR+R_тR-R'_4R_1}{R_pR_1+R'_4R_1+R_pR+R_1R-R'_4R_т}, \tag{5-7-9}$$

из которого следует, что при изменении температуры прибора возникает дополнительная температурная погрешность, вызываемая изменением сопротивлений рамок логометра и соответственно изменением значения отношения токов в рамках. Однако при равновесии моста, когда $R_1=R_т$, и одинаковом изменении сопротивлений рамок логометра под влиянием температуры отношение токов I_p/I'_p не изменяется и остается равным единице. При нарушении равновесия моста логометр меняет свои показания с изменением температуры, и погрешность прибора может превышать допускаемые пределы. Для уменьшения дополнительной температурной погрешности прибора обычно часть резистора R'_4 изготовляют из меди, а часть из манганина. Обозначим часть резистора R'_4, изготовляемую из меди через R_4 и часть, изготовляемую из манганина, через R_5. Тогда при температуре t, отличной от температуры градуировки ($t_{20}=20°C$), сопротивление R'_4 равно

$$R'_4=R_5+R_4+R_4\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}}-1\right); \tag{5-7-10}$$

сопротивление рамок R_p и R'_p при температуре t определяется по формуле

$$R_p=R'_p=R_{20}+R_{20}\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}}-1\right), \tag{5-7-11}$$

где R_{20} — сопротивление рамок при $t_{20}=20°C$, Ом; α — температурный коэффициент электрического сопротивления меди, $°C^{-1}$.

Подставляя выражения (5-7-10) и (5-7-11) в уравнение (5-7-9), после преобразований получим:

$$\frac{I_p}{I'_p}=\frac{A_1+B_1}{A_2+B_2}, \tag{5-7-12}$$

где

$$\left.\begin{aligned}
A_1&=R_{20}R_т+R_5R_т+R_тR_4+R_{20}R+R_тR-R_1R_4-R_1R_5;\\
A_2&=R_{20}R_1+R_5R_1+R_1R_4+R_{20}R+R_1R-R_тR_4-R_тR_5;\\
B_1&=(R_{20}R_т+R_4R_т+R_{20}R-R_1R_4)\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}}-1\right);\\
B_2&=(R_{20}R_1+R_4R_1+R_{20}R-R_тR_4)\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}}-1\right).
\end{aligned}\right\} \tag{5-7-13}$$

Если принять

$$\frac{A_1}{B_1}=\frac{A_2}{B_2}, \tag{5-7-14}$$

то отношение токов не будет зависеть от окружающей температуры. Выражение (5-7-14) обычно называют условием температурной компенсации. Подставляя в формулу (5-7-14) значения (5-7-13) и решая относительно R_4, получаем:

$$R_4=\frac{R_{20}\left[R_5\left(2R_тR-R_1^2-2R_1R+R_т^2\right)+R_2\left(R_т-R_1\right)\right]}{R\left(R_т^2-R_1^2\right)},$$

или после преобразования

$$R_4 = \frac{R_{20}\left[R_5\left(2R + R_{\text{т}} + R_1\right) + R^2\right]}{R\left(R_{\text{т}} + R_1\right)}. \qquad (5\text{-}7\text{-}15)$$

Поскольку в уравнение (5-7-15) входит сопротивление термометра $R_{\text{т}}$, то полную компенсацию температурной погрешности с помощью резистора R_4 можно получить только в одной точке, не считая случая, когда схема моста уравновешена. Однако температурная погрешность в точках, где не обеспечивается компенсация, значительно меньше той погрешности, которая была бы при отсутствии медного резистора R_4. Например, для выпускаемых логометров класса 1,5 изменение показаний прибора, вызванное изменением температуры окружающего воздуха от нормальной (20 ± 5°С) до любой температуры в пределах от 5 до 50°С, не должно превышать ±0,75% нормирующего значения измеряемой величины на каждые 10°С. За нормирующее значение принимают разность конечных значений диапазона измерений. Нормирующее значение и диапазон измерения выражаются в единицах сопротивления.

Рассмотренные выше схемы логометров не исчерпывают всех возможных вариантов, но являются типовыми для этой группы приборов, применяемых в комплекте с термометрами сопротивления и реостатными передающими преобразователями (гл. 8).

Рассмотрим схему логометра типа Л-64 класса точности 1,5, в основу устройства которого положены описанная выше симметричная мостовая логометрическая схема (рис. 5-7-2) и измерительный механизм с внутрирамочным магнитом (гл. 4). Эта схема используется также в логометрах типа ЛПр с измерительным механизмом, показанным на рис. 5-7-3, *а*.

Принципиальная электрическая схема логометра типа Л-64 (или ЛПр) с подключенным к нему по трехпроводной схеме термометром сопротивления приведена на рис. 5-7-4. Назначение резисторов мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 и R_5 рассмотрено выше. Резистор R_6, включенный последовательно с сопротивлением $R_{\text{т}}$ термометра, является добавочным в этом плече моста. Цифры на схеме (*1*, *2*, *3* и *4*) соответствуют принятым номерам зажимов на крышке логометра ЛПр.

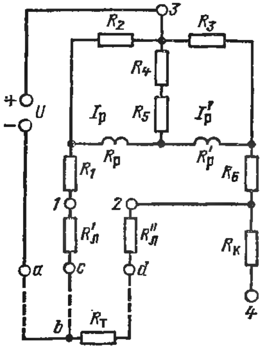


Рис. 5-7-4. Принципиальная схема логометра Л-64.

Логометры Л-64 и ЛПр рассчитаны на подключение к ним термометров сопротивления как по двухпроводной, так и по трехпроводной схемам при определенных значениях сопротивления внешних соединительных линий $R_л$. Номинальное значение сопротивления линий $R_л$, соединяющих логометры с термометрами, установлено равным 5 (или 15) Ом и указывается на его циферблате. Заданное значение сопротивления линии обеспечивается с помощью двух катушек $R'_л$ и $R''_л$, включенных симметрично в оба плеча моста. Сопротивление каждой подгоночной катушки составляет 0,5 $R_л$ с допускаемым отклонением от номинала не более +5% от $R_л$.

Подгонка сопротивления линии при трехпроводной схеме включения термометра (рис. 5-7-4) осуществляется раздельно для левого и правого проводов с помощью катушек $R'_л$ и $R''_л$. Измерение сопротивления каждого провода и соответствующей катушки при подгонке производится переносной поверочной установкой типа ППУ-55 или переносным мостом, погрешности измерения которых не должны превышать ±0,2% измеряемой величины.

При двухпроводной схеме включения термометра провод *ab* присоединяют к зажиму *c* (рис. 5-7-4), и подгонку сопротивления двух проводов линии до значения 2,5 (или 7,5) Ом осуществляют с помощью одной катушки $R''_л$. При двухпровод-

ной схеме включения термометра катушка $R'_л$ оказывается включенной последовательно с плечом R_1. Отклонение сопротивления этой катушки от номинального (2,5 или 7,5 Ом) не должно превышать $\pm0{,}01$ Ом.

Для периодической поверки правильности показаний логометра в условиях эксплуатации предусмотрена контрольная катушка $R_к$ (рис. 5-7-4), сопротивление которой $R_к$ равно сопротивлению термометра при температуре, соответствующей контрольной отметке на шкале прибора. При проверке логометра предварительно отключают источник питания и после этого закорачивают зажимы в головке термометра, а конец провода, присоединенный к зажиму *2*, переключают на зажим *4*. Выполнив эти операции, подключают источник питания; при исправном приборе его стрелка должна установиться на красную контрольную черту, расположенную примерно на середине шкалы.

По внешнему виду и устройству корпуса логометр типа Л-64 не отличается от профильного пирометрического милливольтметра типа М-64, показанного на рис. 4-11-8. Логометр Л-64, так же как и прибор М-64, предназначается для утопленного монтажа на щите.

При определении погрешности измерения температуры логометром в комплекте с термометром сопротивления необходимо иметь в виду, что предел допускаемой основной погрешности и изменение показаний логометра под действием влияющих величин в пределах нормированной области их значений выражаются как приведенные погрешности в процентах нормирующего значения измеряемой величины, а максимальное допускаемое отклонение от градуировочной таблицы термометра сопротивления нормируется в виде абсолютной погрешности (табл. 5-2-1).

При оценке погрешности измерения необходимо также учитывать, что температура чувствительного элемента термометра по ряду причин может отличаться от действительной температуры среды (гл. 6).

При измерении температуры термометром сопротивления в комплекте с логометром возможны погрешности от изменения сопротивления внешней соединительной линии или вследствие неточной ее подгонки. Значение дополнительной погрешности при трехпроводной схеме включения термометра, обусловленной изменением сопротивления линии под влиянием изменения температуры окружающего воздуха, можно определить с помощью упрощенной формулы

$$\Delta_л = \frac{R_б + R_т + R''_л + R''_л\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}} - 1\right)}{R_1 + R'_л + R'_л\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}} - 1\right)}, \qquad (5\text{-}7\text{-}16)$$

где α — температурный коэффициент электрического сопротивления меди; t — средняя температура окружающего воздуха вдоль линии; t_{20} — температура, соответствующая градуировке ($t_{20} = 20$°С).

Остальные обозначения соответствуют принятым выше. Если мост уравновешен, то при правильной подгонке сопротивления линий $\Delta_л = 0$.

Следует также отметить, что изменения показаний логометров могут быть вызваны наличием внешних магнитных полей, а также

влиянием ферромагнитного щита. Рекомендации для уменьшения или устранения этих влияний на показания приведены при рассмотрении милливольтметров (гл. 4).

5-8. Общие сведения об автоматических уравновешенных мостах

Автоматические уравновешенные мосты широко применяются в различных отраслях промышленности для измерения и записи температуры в комплекте с термометрами сопротивления. Они могут быть использованы для измерения, записи и сигнализации или регулирования температуры. В этом случае автоматические уравновешенные мосты, так же как и автоматические потенциометры, снабжаются дополнительным устройством для сигнализации или регулирования температуры. Некоторые модификации уравновешенных мостов снабжаются реостатными преобразователями для дистанционной передачи показаний, схемы и устройство которых рассматриваются ниже (гл. 8). Автоматические уравновешенные мосты находят также применение для измерения других величин, изменение значений которых может быть преобразовано в изменение активного электрического сопротивления.

Измерительная схема автоматических уравновешенных мостов в принципе не отличается от схемы лабораторного четырехплечего моста за исключением того, что уравновешивание его, осуществляемое обычно перемещением движка по калиброванному реохорду, производится не вручную, а автоматически с помощью специальных следящих систем, устроенных так же, как и следящие системы автоматических потенциометров.

Автоматические уравновешенные мосты являются техническими приборами высокого класса точности. Они бывают показывающие, показывающие и самопишущие с записью на дисковой и ленточной диаграмме. Приборы с дисковой диаграммной бумагой служат для измерения и записи температур в одной точке и называются одноточечными. Уравновешенные мосты с ленточной диаграммой изготовляются как одноточечные, так и многоточечные, т. е. для измерения и записи температуры в одной или нескольких (3, 6, 12) точках.

Питание измерительной схемы уравновешенных мостов осуществляется напряжением переменного тока 6,3 В, частотой 50 Гц от вторичной обмотки силового трансформатора усилителя. Питание силовой цепи приборов производится от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Применяемые усилители в уравновешенных мостах обычно снабжаются входным трансформатором.

Автоматические уравновешенные мосты, предназначенные для работы в комплекте с термометрами сопротивления, выпускаются с градуировкой шкалы в градусах Цельсия. При этом необходимо иметь в виду, что их температурная шкала действительна только

для термометра сопротивления определенной градуировки и заданного значения сопротивления внешней соединительной линии.

Для автоматических уравновешенных мостов, выпускаемых отечественной приборостроительной промышленностью, установлены аналогично автоматическим потенциометрам классы точности (по показаниям), а именно 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 (ГОСТ 7164-71).

Пределы допускаемой основной погрешности показаний автоматических уравновешенных мостов, выраженные в процентах нормирующего значения измеряемой величины (§ 1-5), на всех отметках шкалы не должны превышать: ±0,25; ±0,5; ±1,0; 1,5% — для классов точности 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 (соответственно). За нормирующее значение принимают разность конечных значений диапазона измерения. Нормирующее значение и диапазон измерения выражаются в единицах сопротивления.

Пределы допускаемой основной погрешности на всех отметках диаграммы самопишущих уравновешенных мостов в зависимости от класса точности и ширины поля записи нормируются аналогично с автоматическими потенциометрами (§ 4-17).

Автоматические уравновешенные мосты выпускаются с временем прохождения указателем прибора всей длины шкалы 2,5 с и менее (быстродействующие), а также более 2,5 с (например, 10 с). Возможные дополнительные погрешности и некоторые другие технические характеристики уравновешенных мостов одинаковы с приведенными выше для автоматических потенциометров (§ 4-17).

Ниже будут рассмотрены выпускаемые в настоящее время автоматические уравновешенные мосты типов КПМ, КВМ и КСМ, разработанные ГСКБ СКА за последние годы [25]. Эти приборы удовлетворяют в большей степени современным требованиям промышленности по сравнению с ранее выпускаемыми автоматическими уравновешенными мостами МП, ЭМВ, ЭМД, МС и др.

5-9. Принципиальные измерительные схемы автоматических уравновешенных мостов

В автоматических уравновешенных мостах широко используется измерительная схема четырехплечего моста с реохордом, включенным так, что его движок может изменять положение точки подключения одной из вершин измерительной диагонали по отношению к двум прилежащим плечам моста.

Реохорд может быть включен в одну из вершин измерительной диагонали моста, например между двумя плечами, не имеющими термометра сопротивления, или между двумя плечами, в одно из которых включен термометр сопротивления. Рассмотрим оба варианта и выясним, какой из них заслуживает большего внимания.

Первый вариант принципиальной измерительной схемы автоматического уравновешенного моста представлен на рис. 5-9-1. Схема состоит из трех плеч, выполненных из манганиновых резисторов R_1, R_2 и R_3, четвертого плеча, содержащего измеряемое сопро-

тивление термометра $R_т$, и калиброванного реохорда $R_р$. В измерительную диагональ включен нуль-индикатор (НИ), а к точкам c и d подключен источник питания U.

При изменении сопротивления термометра $R_т$ нарушается равновесие моста. Поскольку мостовая схема приходит в равновесие при равенстве произведений сопротивлений противоположных плеч, то, перемещая движок реохорда и распределяя сопротивление $R_р$ между плечами R_1 и R_3, можно найти положение равновесия схемы по отсутствию отклонения указателя нуль-индикатора, т. е. когда потенциалы в точках a и b будут равны. Таким образом, по положению движка реохорда можно определить значение измеряемого сопротивления термометра, а следовательно, и его температуру.

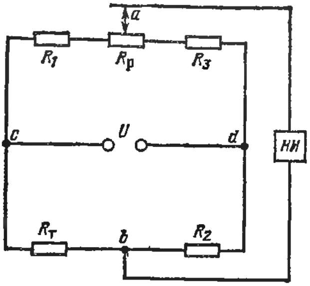


Рис. 5-9-1. Принципиальная измерительная схема автоматического уравновешенного моста с реохордом, включенным между плечами R_1 и R_3.

Предположим, что мост уравновешен и движок a находится слева в начале реохорда, а сопротивление термометра $R_т$ соответствует начальному значению измеряемой температуры и равно $R_{т.н}$. Положению равновесия мостовой схемы соответствует уравнение

$$R_{т.н}(R_3+R_р)=R_1R_2. \qquad (5\text{-}9\text{-}1)$$

Если с изменением температуры термометра сопротивление его увеличится до значения $R_т = R_{т.н} + \Delta R_т$, то новому положению равновесия моста будет соответствовать равенство

$$(R_{т.н}+\Delta R_т)\,[R_3+(1-m)\,R_р]=(R_1+mR_р)\,R_2, \qquad (5\text{-}9\text{-}2)$$

где $m = R'_р/R_р$ (здесь $R'_р$ — сопротивление участка реохорда левее движка a).

Решая уравнение (5-9-2) относительно m и учитывая выражение (5-9-1), получаем:

$$m=\frac{(R_3+R_р)\,\Delta R_т}{R_р\,(R_2+R_{т.н}+\Delta R_т)}. \qquad (5\text{-}9\text{-}3)$$

В знаменатель формулы (5-9-3) входит переменное сопротивление $\Delta R_т$, вследствие этого $m = f(\Delta R_т)$ изменяется не по линейному закону, таким образом, шкала прибора в единицах сопротивления будет неравномерной. Однако если $\Delta R_т \ll R_2 + R_{т.н}$, то шкала моста будет приближаться к линейной.

У второго варианта принципиальной измерительной схемы уравновешенного моста верхняя цепь состоит из $R_т$, $R_р$ и R_3, а нижняя — из R_1 и R_2 (рис. 5-9-1). Повторяя приведенные выше рассуждения, получим для тех же двух положений равновесия мостовой схемы

следующие уравнения:

$$R_1 R_3 = (R_{т.н} + R_р) R_2; \qquad (5\text{-}9\text{-}4)$$

$$R_1 (R_3 + mR_р) = [R_{т.н} + \Delta R_т + (1 - m) R_р] R_2, \qquad (5\text{-}9\text{-}5)$$

где $m = R'_р / R_р$ (здесь $R'_р$ — сопротивления участка реохорда правее движка a).

Решая равенство (5-9-5) относительно m и учитывая уравнение (5-9-4), получаем:

$$m = \frac{\Delta R_т R_2}{R_р (R_1 + R_2)}. \qquad (5\text{-}9\text{-}6)$$

Уравнение (5-9-6) показывает, что $m = f(\Delta R_т)$ является линейной функцией $\Delta R_т$. Следовательно, основным преимуществом второго варианта схемы уравновешенного моста по сравнению с первым является то, что он позволяет осуществлять равномерную шкалу прибора в единицах сопротивления. Измерительная схема второго варианта является более совершенной и поэтому широко используется в современных автоматических уравновешенных мостах,

5-10. Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

В автоматических уравновешенных мостах используется, как отмечалось выше, измерительная схема четырехплечего моста с реохордом. Эта схема, обеспечивая высокую точность техническим приборам, позволяет выполнять шкалы моста односторонние, безнулевые и двусторонние (§ 1-5). Показанная на рис. 5-10-1 принципиальная схема показывающего и самопишущего прибора может рассматриваться как типовая схема автоматических уравновешенных мостов. Показывающие уравновешенные мосты имеют такую же принципиальную схему, но у них отсутствует блок записи.

На принципиальной схеме рис. 5-10-1 приняты следующие обозначения: $R_р$ — реохорд; $R_ш$ — шунт реохорда, служащий для подгонки сопротивления $R_р$ до заданного нормированного значения $R_{н.р} = R_р R_ш (R_р + R_ш)^{-1} = 90$ или $100 \pm 0{,}1$ Ом; *ТО* — токоотвод; $R_п$ — резистор для установления диапазона измерения; $R_д$ — резистор добавочный для подгонки начального значения шкалы (обычно $R_д \approx 5{,}5$ Ом); R_1, R_2 и R_3 — резисторы мостовой схемы; $R_б$ — балластный резистор в цепи питания для ограничения тока; $R_т$ — термометр сопротивления; $R_л$ — резисторы для подгонки сопротивления линии; *РД* — асинхронный конденсаторный реверсивный двигатель; *СД* — синхронный двигатель. Назначение конденсаторов C_1, C_2 и C_3 рассматривалось выше (§ 4-18).

Все резисторы мостовой измерительной схемы изготовляют из стабилизированной манганиновой проволоки. Реохорд $R_р$ и токоотвод *ТО* новых автоматических уравновешенных мостов типов

КСМ, КПМ аналогичны по своему устройству с реохордом и токоотводом, применяемыми в автоматических потенциометрах КСП и КПП (§ 4-18). В уравновешенных мостах прежних разработок МП, МС и ЭМД и других реохорд и токоотвод выполнены аналогично с потенциометрами, ранее выпускаемыми (§ 4-18).

Как видно из рис. 5-10-1, термометр сопротивления подключен к мосту по трехпроводной схеме. В этом случае сопротивление проводов, служащих для присоединения термометра к мосту, распределяется между двумя прилегающими плечами моста $R_т$ и R_1. Благодаря этому достигается значительное снижение значения дополнительной погрешности, вызываемой возможным изменением сопротивления соединительных проводов вследствие изменения

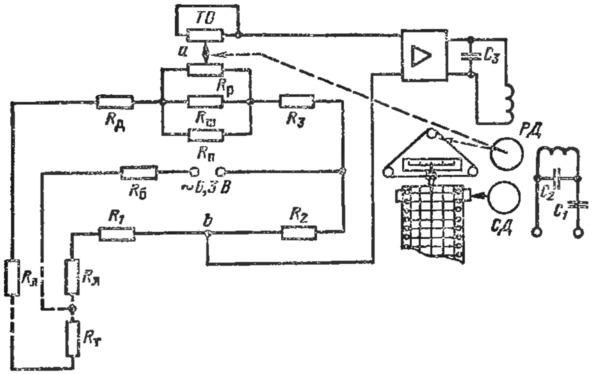


Рис. 5-10-1. Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста.

температуры окружающего воздуха. Номинальное суммарное значение сопротивления проводов, соединяющих термометр с мостом, установлено равным 5 Ом. Таким образом, сопротивление каждого провода, а следовательно, и подгоночных резисторов $R_л$, принятое при градуировке прибора, равно 2,5 Ом с допускаемым отклонением от номинала не более ±0,01 Ом.

При нарушении равновесия мостовой схемы прибора вследствие изменения сопротивления $R_т$ термометра на вход усилителя подается напряжение небаланса с вершин a и b. Это напряжение усиливается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя. Выходной вал двигателя, кинематически связанный с движком реохорда и кареткой, передвигает их до тех пор, пока напряжение небаланса, уменьшаясь, не станет равным нулю (точнее, меньше той величины его, которую чувствует усилитель). При достижении равновесия мостовой схемы ротор реверсивного двигателя останавливается, а движок реохорда и каретка с указателем и пером занимают положение, соответствующее измеряемому сопротивлению термометра. Положению равновесия

мостовой схемы соответствует уравнение

$$[R_т+R_д+R_л+(1-m)R_{п.р}]R_2=(R_1+R_л)(R_3+mR_{п.р}), \qquad (5\text{-}10\text{-}1)$$

где $R_{п.р}$ — приведенное сопротивление реохорда ($R_{п.р}=R_{и.р}R_п\times\times(R_{и.р}+R_п)^{-1}$; $m=R'_{п.р}/R_{п.р}$ (здесь $R'_{п.р}$ — сопротивление участка реохорда правее движка a).

Решая уравнение (5-10-1) относительно $R_т$, получаем:

$$R_т=\frac{R_{п.р}(mR_1+mR_2-R_2)+R_1R_3-R_дR_2}{R_2}+\frac{(R_3-R_2+mR_{п.р})R_л}{R_2}, \qquad (5\text{-}10\text{-}2)$$

где $R_л=2{,}5$ Ом при $t_{20}=20$°С.

Для эксплуатационных условий это уравнение принимает вид:

$$R_т=\frac{R_{п.р}(mR_1+mR_2-R_2)+R_1R_3-R_дR_2}{R_2}+\frac{(R_3-R_2+mR_{п.р})R_л\left(\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t_{20}}\right)}{R_2}, \qquad (5\text{-}10\text{-}3)$$

где $R_л=2{,}5$ Ом при $t_{20}=20$°С; t — средняя температура воздуха вдоль проводов в условиях эксплуатации, °С ($t>t_{20}$); α — температурный коэффициент электрического сопротивления меди, $°С^{-1}$.

Уравнения (5-10-2) и (5-10-3) позволяют определить возможное изменение показаний моста вследствие изменения сопротивления проводов, обусловленного повышением (или понижением) температуры окружающего воздуха.

Как показывают расчеты, для автоматических уравновешенных мостов КСМ2 и КСМ4 изменение их показаний вследствие изменения сопротивления проводов ($R_л$), обусловленного повышением температуры воздуха до $t=40$°С, лежит в пределах от 0,05 до 0,1% нормирующего значения измеряемой величины для различных диапазонов измерения и градуировок гр21, гр23.

5-11. Устройство автоматических уравновешенных мостов

Автоматические уравновешенные мосты, применяемые для измерения и записи температуры и других величин, изменение которых может быть преобразовано в изменение активного сопротивления, по конструктивному их оформлению можно разделить на следующие основные группы: показывающие типа КПМ1 и КВМ1; показывающие и самопишущие с ленточной диаграммой типа КСМ1, КСМ2 и КСМ4; показывающие и самопишущие с дисковой диаграммой типа КСМ3. Приборы этих типов, выпускаемые в нескольких модификациях, применяются также для сигнализации или регулирования температуры.

Внешнее оформление корпусов, кинематика механизмов, сигнальные (или регулирующие) и другие дополнительные устройства уравновешенных мостов типов КПМ1, КВМ1, КСМ1, КСМ2, КСМ3 и КСМ4 ничем не отличаются от автоматических потенциометров типов КПП1, КВП1, КСП2, КСП3 и КСП4 соответственно; по своему устройству автоматические уравновешенные мосты отличаются от автоматических потенциометров только измерительной схемой.

В зависимости от размеров корпуса, отдельных элементов и блоков автоматические уравновешенные мосты, так же как и автоматические потенциометры и другие приборы, разделяются на миниатюрные (КПМ1, КСМ1), малогабаритные (КВМ1, КСМ2, КСМ3) и нормальногабаритные (КСМ4).

Для ознакомления с основными характеристиками автоматических уравновешенных мостов рассмотрим некоторые модификации приборов.

Автоматические показывающие уравновешенные мосты. Уравновешенные показывающие мосты широко применяются в практике технологического контроля как оперативные приборы. Они выпускаются с плоской неподвижной шкалой (длина шкалы 300 мм) типа КПМ1 и с цилиндрической вращающейся шкалой (длина шкалы 500 мм) типа КВМ1. Показывающие одноточечные мосты КПМ1 и КВМ1 выпускаются с двух- или трехпозиционным дополнительным устройством для сигнализации или регулирования. Некоторые модификации этих приборов снабжают реостатными преобразователями для дистанционной передачи показаний или для работы с электрическими регулирующими устройствами.

Уравновешенные мосты КПМ1 имеют класс точности 0,5. Эти приборы в практике технологического контроля широко применяют с дополнительным переключателем для измерения температуры в нескольких точках. Мосты КПМ1 выпускаются с временем прохождения указателем всей длины шкалы 2,5 или 10 с в зависимости от модификации.

Показывающие уравновешенные мосты типа КВМ1 выпускаются одноточечные и многоточечные для измерения температуры с помощью термометров сопротивления в нескольких точках. В последнем случае эти приборы снабжаются встроенным клавишным 6 или 12-точечным переключателем. Серийно выпускаемые мосты КВМ1 имеют класс точности 0,5, а по специальному заказу могут быть изготовлены класса точности 0,25. Они выпускаются с временем прохождения циферблатом от начальной до конечной отметок шкалы относительно неподвижного указателя 2,5 или 10 с в зависимости от модификации.

Измерительная схема уравновешенных мостов КПМ1 и КВМ1 аналогична описанной выше (рис. 5-10-1). Реохорд этих приборов выполнен на дисковом каркасе. В приборах КПМ1 используются полупроводниковые усилители типа УПД2-04 или УПД2-03, а в мостах КВМ1 — типа УПД2-04. Для привода следящей системы в этих приборах применяется асинхронный реверсивный двигатель типа ДКИР-04. В этих приборах предусмотрена возможность применения также и асинхронного реверсивного двигателя типа РД-09П2.

Автоматические показывающие и самопишущие уравновешенные мосты. Показывающие и самопишущие уравновешенные мосты выпускаются миниатюрные, малогабаритные и нормальных габаритов. Приборы миниатюрные и малогабаритные широко применяют для измерения и записи температуры при автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности, в частности, в энергетике. Они удобны, так же как и миниатюрные показывающие приборы, для создания мнемонических схем и малогабаритных щитов и пультов управления технологическим процессом. Мосты нормальных габаритов применяют в тех случаях, когда необходимо осуществлять запись температуры с большей точностью, а вместе с тем и обеспечить лучшую наглядность. Кроме того, эти приборы широко используются при проведении испытаний и научно-исследовательских работ.

Миниатюрные уравновешенные мосты КСМ1 имеют шкалу длиною 100 мм. Запись температуры осуществляется на диаграммной ленте с шириной поля записи 100 мм пишущим устройством, чернила в которое поступают по гибкой капиллярной трубке из специального баллона, установленного внутри прибора. Эти мосты отличаются от миниатюрных приборов прежних разработок типа МСМ тем, что у них шкала расположена горизонтально, а диаграммная лента перемещается вертикально сверху вниз. Скорость перемещения диаграммной ленты может быть установлена 10, 20, 40, 60 и 120 мм/ч. Принципиальная схема мостов КСМ1 аналогична схеме, показанной на рис. 5-10-1. Пределы допускаемой основной погрешности показаний и записи приборов КСМ1 не превышают $\pm 1\%$ нормирующего значения измеряемой величины.

Автоматические уравновешенные мосты типа КСМ2 и КСМ4, имеющие длину шкалы 160 и 250 мм соответственно, выпускаются одноточечные и многоточечные на 3, 6 и 12 точек. Принципиальная схема одноточечных уравновешенных мостов КСМ2 и КСМ4 аналогична рассмотренной выше (см. рис. 5-10-1). В многоточечных мостах этого типа для поочередного подключения термометров сопротивления к измерительной схеме служит переключатель, который устанавливают на крон-

штейне внутри корпуса прибора. Запись измеряемой температуры на диаграммной ленте производится специальным механизмом многоточечной записи. Этот механизм отпечатывает на диаграммной ленте точки, характеризующие значение измеряемой температуры, и рядом с точкой ставит цифры, показывающие номер термометра сопротивления, который подключен к измерительной схеме переключателем в данный момент. Переключатель и механизм многоточечной записи приводятся в действие от синхронного двигателя.

Автоматические уравновешенные мосты КСМ2 выпускаются класса точности 0,5, а КСМ4 — классов точности 0,25 и 0,5. Приборы КСМ2 и КСМ4 имеют диаграммные ленты с шириной поля записи соответственно 160 и 250 мм. Пределы допускаемой основной погрешности записи уравновешенных мостов КСМ2 и КСМ4 не превышают ± 1 и $\pm 0{,}5\%$ нормирующего значения измеряемой величины (соответственно).

Автоматические показывающие и самопишущие мосты типа КСМ3. Автоматические уравновешенные мосты с диаграммным диском КСМ3 являются одното-

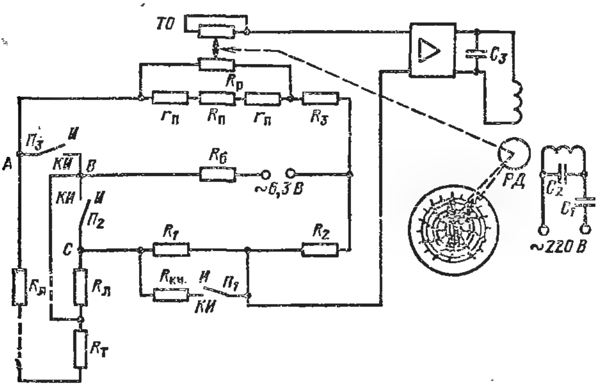


Рис. 5-11-1. Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста КСМ3.

чечными малогабаритными приборами с временем прохождения всей шкалы 5 и 10 с. На рис. 5-11-1 показана принципиальная схема уравновешенного моста КСМ3. Сопротивление реохорда $R_р$ для всех модификаций уравновешенных мостов КСМ3 принято равным приблизительно 270 Ом [14]. Резисторы ($R_п$, $r_п$, R_1, R_2, R_3 и $R_л$) измерительной схемы моста имеют то же самое назначение, что и в схеме на рис. 5-10-1.

В рассматриваемой схеме уравновешенного моста предусмотрен контроль исправности прибора. При установке переключателей $П_1$, $П_2$ и $П_3$ в положение *КИ* замыкаются зажимы *А*, *В* и *С* и одновременно параллельно резистору R_1 включается резистор $R_{к.\,и}$, что вызывает разбаланс схемы моста. При исправном приборе указатель должен установиться против красной отметки на шкале.

Даваемую в заводской инструкции по эксплуатации КСМ3 [11] рекомендацию о возможности корректировки сопротивления реохорда по мере его износа с помощью подгоночного резистора $r_п$ следует считать неприемлемой. Износ реохорда по его длине, как правило, неодинаковый и вследствие этого его следует заменять новым. Реохорд целесообразно изготовлять с заданным нормированным сопротивлением $R_{н.\,р}$, что значительно упрощает его замену.

Уравновешенные мосты КСМ3 выпускаются класса точности 0,5. Пределы допускаемой основной погрешности записи на всех отметках диаграммы равны $\pm 1\%$ нормирующего значения измеряемой величины.

Приборы КСМ3 могут быть снабжены выходными устройствами (ферродинамическими, частотными, пневматическими преобразователями), а также дополнительными устройствами для регулирования. При наличии в мостах КСМ3

выходных устройств предел допускаемой основной погрешности преобразования входного сигнала в выходной не должен превышать 1,5—2,5% разности верхнего и нижнего пределов изменения выходного сигнала в зависимости от типа преобразователя и места привязки его к механизму прибора.

5-12. Автоматические компенсационные приборы для работы с малоомными термометрами сопротивления

При измерении малоомными термометрами с чувствительным элементом из платиновой проволоки диаметром 0,2—0,5 мм температур до 1000°С и выше приходится измерять сопротивления, соизмеримые с сопротивлением проводов, соединяющих термометр с прибором. Аналогичный случай имеет место и при измерении платиновым термометром низких температур в пределах от —200 до —260°С. В этом случае при температурах, равных —240, —250 и —260°С, платиновый термометр с номинальным значением сопротивления при 0°С R_0 = 100 Ом имеет сопротивление соответственно 2,750; 1,093 и 0,510 Ом.

Рассмотренные выше серийно выпускаемые автоматические уравновешенные мосты, применяемые в комплекте со стандартными термометрами сопротивления (ГОСТ 6651-59), обеспечивают измерение температур только в интервале от —200 до +650°С. Автоматические приборы, необходимые для измерения температуры ниже —200°С и выше +650°С с помощью термометров сопротивления, в настоящее время изготавливаются только по специальным заказам.

Для измерения температур малоомными платиновыми термометрами сопротивления, а также низких температур применяют автоматические приборы, разработанные НПО «Термоприбор» [19].

Ниже в качестве примера рассмотрим одну из схем автоматического компенсационного прибора, разработанного НПО «Термоприбор» для измерения малых значений сопротивления (около 0,1—0,01 Ом). Измерительная схема этого прибора имеет более высокую чувствительность по сравнению с уравновешенными мостами, что позволяет обеспечить измерение низких температур в промышленных условиях с достаточной точностью, а также измерять температуру с использованием малоомных термометров сопротивления. Применение четырехпроводной схемы присоединения термометра позволило полностью исключить влияние на результаты измерения сопротивления проводов, соединяющих термометр с прибором.

Принципиальная схема автоматического компенсационного прибора переменного тока для измерения и записи низких температур (ниже 0°С) приведена на рис. 5-12-1. Здесь $R_т$ — термометр сопротивления; $R_н$ — резистор для подгонки начального значения шкалы; $R_{п.р}$ — приведенное сопротивление реохорда ($R_{п.р}$ = $= R_{ш.р}R_п$ ($R_{ш.р}$ + $R_п$) [1]; $R_б$ — балластный резистор для ограничения тока в цепи термометра; $Тр_т$ — трансформатор тока. Остальные обозначения соответствуют принятым выше.

Питание измерительной схемы осуществляется напряжением переменного тока 6,3 В, частотой 50 Гц от вторичной обмотки силового трансформатора усилителя. Термометр сопротивления $R_т$ и балластный резистор включены в схему последовательно с первичной обмоткой трансформатора тока $Тр_т$. Нагрузкой вторичной обмотки трансформатора тока являются резистор $R_н$ и приведенное сопротивление реохорда $R_{п.р}$. Рассматриваемая схема прибора позволяет измерять активное сопротивление термометра путем автоматической компенсации напряжения, возникающего на зажимах термометра bc, противоположным ему по фазе напряжением, снимаемым с резистора $R_н$, и сопротивления реохорда левее движка a.

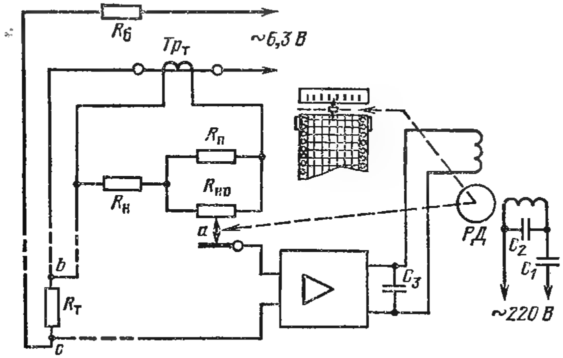


Рис. 5-12-1. Принципиальная схема автоматического компенсационного прибора.

Когда измеряемая температура, а следовательно, и сопротивление термометра соответствуют начальному значению шкалы прибора, движок реохорда a находится на схеме в крайнем правом положении. В этом случае напряжение на термометре компенсируется напряжением, снимаемым с резистора $R_н$ и реохорда $R_{п.р}$:

$$I_1 R_{т.н} = I_2 (R_н + R_{п.р}), \qquad (5\text{-}12\text{-}1)$$

где I_1 — ток, протекающий через термометр сопротивления и первичную обмотку трансформатора тока; I_2 — вторичный ток трансформатора; $R_{т.н}$ — сопротивление термометра, соответствующее начальному значению шкалы прибора.

При нарушении равновесия напряжений вследствие уменьшения сопротивления термометра, а следовательно, и измеряемой температуры на вход усилителя подается напряжение небаланса. Это напряжение усиливается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя $РД$. Выходной вал двигателя, кинематически связанный с движком реохорда и указателем, передвигает их и приводит измерительную схему в равновесие. В этом случае положению равновесия схемы соответствует

уравнение

$$I_1 R_т = I_2 (R_н + mR_{п.р}), \qquad (5\text{-}12\text{-}2)$$

где $m = R'_{п.р}/R_{п.р}$ (здесь $R'_{п.р}$ — сопротивление участка реохорда левее движка a).

Решая уравнение (5-12-2) относительно $R_т$, получаем:

$$R_т = k_I (R_н + mR_{п.р}), \qquad (5\text{-}12\text{-}3)$$

где $k_I = I_2/I_1$ — коэффициент трансформации трансформатора тока.

В уравнение (5-12-3), связывающее измеряемое значение сопротивления термометра с сопротивлением реохорда $R_{п.р}$ и резистора $R_н$, входят не значения токов, а их отношение или коэффициент k_I, который в достаточно широких пределах изменения намагничивающего тока имеет постоянное значение. Это позволяет считать, что колебания напряжения питания или изменения сопротивлений токовых проводников термометра, вызывающие изменение тока I_1, на результаты не влияют.

С другими вариантами автоматических компенсационных приборов, разработанных НПО «Термоприбор», для измерения и записи низких температур, а также для измерения разности температур с помощью термометров сопротивления можно познакомиться в [19].

ГЛАВА ШЕСТАЯ

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ, ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ И СПОСОБЫ ИХ УЧЕТА И УМЕНЬШЕНИЯ

6-1. Общие методические указания

Рассмотренные выше контактные методы и средства измерения температуры широко применяются при контроле и автоматизации различных технологических процессов, а также при проведении исследований. Точность измерения температуры, так же как и других величин, зависит от выбранного метода измерения, от метрологических и динамических характеристик средств измерения, от условий измерения и ряда других причин. Поэтому выбор метода и средств измерения температуры необходимо производить в зависимости от поставленной задачи, требуемой точности и условий измерения.

Под средствами измерения температуры мы будем понимать жидкостные термометры, манометрические термометры и измерительные комплекты, состоящие из термометров сопротивления или термоэлектрических термометров с соответствующими вторичными приборами, нормирующими преобразователями и другими измерительными устройствами. При выборе средств измерения температуры необходимо иметь в виду не ту точность, которая свойственна им

при работе в нормальных условиях, а ту точность, которую приборы могут обеспечить в данных эксплуатационных условиях.

Одновременно с выбором средств измерений в зависимости от их метрологических и динамических характеристик должен стоять вопрос о минимальном и максимальном значениях измеряемой температуры, а следовательно, и о выборе шкалы прибора или диапазона преобразования нормирующего преобразователя. Это связано с тем, что допускаемые погрешности манометрических термометров, вторичных приборов и нормирующих преобразователей выражены в виде приведенных погрешностей в процентах от диапазона измерения (нормирующего значения). Вследствие этого для обеспечения наибольшей точности измерения желательно выбирать вторичный прибор по возможности с безнулевой шкалой, а нормирующий преобразователь — с безнулевым диапазоном преобразования, кроме того, максимальная измеряемая температура должна быть близка к верхнему пределу измерения или диапазона преобразования.

Условия работы вторичных приборов, нормирующих преобразователей и манометрических термометров бывают различны, а именно: при температуре выше или ниже нормальной области значений (например, 20 ± 5°C), при воздействии других влияющих величин (§ 1-5), в местах, подверженных вибрации или с наличием внешних электрических и магнитных полей. Внешние условия, при которых должны работать приборы, могут сильно влиять на точность измерения, что необходимо учитывать при выборе места их установки.

Если вторичные приборы или нормирующие преобразователи работают при температуре окружающего воздуха ниже или выше нормальной области значений, то ввести поправку в их показания в большинстве случаев не представляется возможным. Это объясняется тем, что ни знак, ни числовое значение дополнительных погрешностей этих приборов, возникающих при отклонении влияющих величин от нормальных значений или нормальной области их значений, нам не известны, так как они нормируются со знаками плюс и минус (§ 1-5). В этом случае остается единственный путь — увеличивать на соответствующее значение погрешность измерения (§ 1-7). Следует также иметь в виду, что отклонение влияющих величин не должно превышать определенных — нормированных пределов расширенной области их значений, например, в эксплуатационных условиях температура среды, окружающей вторичные приборы, не должна быть ниже +5 или выше +50°C, среда не должна быть сильно запыленной и не должна разрушающе действовать на приборы. В противном случае необходимо применять специальные защитные устройства или какие-либо другие меры, обеспечивающие удовлетворительные условия работы приборов. Если приборы монтируются на щитах управления, то последние должны устанавливаться в специальных помещениях. В тех случаях, когда приходится устанавливать приборы в таких местах, где вибрация неустранима, применяют амортизаторы или выбирают специальные

приборы. Если вторичный прибор устанавливается на амортизаторах, то провода к нему должны подводиться при помощи гибкого шлангового соединения.

Точность измерения стационарных температур зависит не только от предела допускаемых основной и дополнительных погрешностей применяемых средств измерения, а в равной мере и от условий измерения, от выбранного места, способа установки термоприемника и ряда других причин. Это обусловлено тем, что при применении контактных методов измерения температуры первичный преобразователь (термоприемник) находится в непосредственном контакте со средой, температура которой измеряется. В этих условиях термоприемник является для среды посторонним телом и в той или иной степени нарушает первоначальное температурное поле среды в месте его установки. Средства измерения температуры, на каком бы принципе действия они ни были основаны, показывают только собственную температуру термоприемника, или, точнее, температуру рабочей части (чувствительного элемента) термоприемника. При этом необходимо учитывать, что собственная температура термоприемника по ряду причин может отличаться от действительной температуры среды. При измерении стационарных температур такими причинами являются теплообмен излучением между термоприемником и окружающими его телами, отвод или подвод тепла по термоприемнику вследствие теплопроводности, торможение потока газа и другие причины.

Систематические погрешности измерения стационарных температур, обусловленные указанными причинами, относятся к методическим погрешностям измерения. Для устранения или уменьшения методических погрешностей, происходящих вследствие теплообмена излучением и теплопроводности, необходимо прежде всего обеспечить рациональную и правильную установку термоприемника, а также осуществлять ряд других мероприятий, рассматриваемых ниже.

При измерении стационарных температур в каком-либо месте внутри или на поверхности твердого тела, а также жидкости или газа (пара), движущегося с небольшой (умеренной) скоростью, собственную температуру термоприемника принимают за действительную температуру среды с некоторой методической погрешностью, если ею нельзя пренебречь. Оценка же погрешности результата измерения стационарных температур производится в соответствии с указаниями, сделанными в § 1-4 и 1-7.

При измерении температуры газовых потоков большой скорости, как будет показано ниже (§ 6-5), собственная температура термоприемника не равна действительной (термодинамической) температуре движущегося газа.

При измерении температуры, меняющейся во времени, могут иметь место, наряду с методическими погрешностями, также и динамические погрешности (§ 1-6). Измерению температуры газового потока, меняющейся во времени, при переменных коэффициентах

теплообмена посвящено большое количество работ [37, 38, 27, 39]. Однако до настоящего времени еще не разработана единая инженерная методика оценки динамических погрешностей измерения температуры, меняющейся во времени при переменных коэффициентах теплообмена. Причинами этого являются не столько сложности математического порядка, сколько недостаточность сведений о характере возможных изменений температуры среды, ее скорости, малая изученность процессов нестационарного конвективного теплообмена.

Ниже рассматриваются возможные источники методических погрешностей при различных условиях измерения температуры, а также мероприятия, реализация которых позволяет свести эти погрешности к минимуму. Следует отметить, что задача определения методических погрешностей измерения стационарных температур за счет теплообмена излучением и теплопроводности должна решаться путем совместного учета обоих факторов. Однако с целью упрощения и наглядности ниже рассматриваются отдельно погрешности измерения, происходящие вследствие теплообмена излучением, и погрешности, обусловленные теплопроводностью.

6-2. Методические погрешности при измерении температур газа, обусловленные влиянием теплообмена излучением

При измерении температур газа контактными методами необходимо иметь в виду, что методические погрешности, обусловленные влиянием теплообмена излучением между термоприемником и окружающими его телами или стенкой трубы, при неблагоприятных условиях могут значительно превышать допускаемые погрешности применяемых средств измерения. При рассмотрении влияния излучения на точность измерения температуры газа будем полагать, что газ прозрачен и не поглощает лучистой энергии.

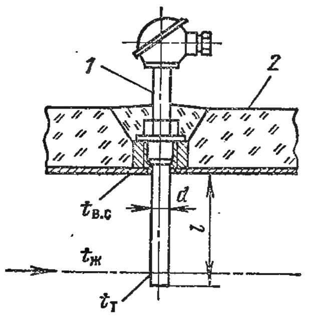


Рис. 6-2-1. Термоприемник, установленный на трубопроводе.

Если допустить, что теплоотвод по термоприемнику *1*, установленному в трубопроводе или газоходе (рис. 6-2-1), отсутствует, то при установившемся тепловом режиме количество тепла, получаемого от газа поверхностью погруженной части термоприемника посредством конвективного теплообмена, равно количеству тепла, отдаваемого поверхностью термоприемника путем теплообмена излучением с поверхностью стенки трубы.

Количество тепла, полученное поверхностью термоприемника от газа, протекающего в трубопроводе,

$$Q_к = \alpha F (t_ж - t_т), \qquad (6\text{-}2\text{-}1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от газа к термоприемнику, Вт/(м$^2\cdot$К); F — поверхность погруженной части термоприемника, м^2; $t_ж$ — температура газа, протекающего в трубопроводе, °С; $t_т$ — собственная температура рабочей части термоприемника, °С.

Количество тепла, отдаваемое поверхностью погруженной части термоприемника путем лучистого теплообмена с поверхностью стенки трубы, равно:

$$Q_л = \varepsilon_{пр}\sigma_0 F\left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{в.с}}{100}\right)^4\right], \qquad (6\text{-}2\text{-}2)$$

где $\varepsilon_{пр}$ — приведенный коэффициент черноты системы двух тел, т. е. в данном случае поверхностей термоприемника и стенки трубы; σ_0 — константа излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана—Больцмана): $\sigma_0 = 5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/(м$^2\cdot$К^4); $T_т$ и $T_{в.с}$ — температура рабочей части термоприемника и внутренней стенки трубы, К.

Так как термоприемник находится внутри трубы и поверхность F термоприемника мала по сравнению с поверхностью стенки трубы, участвующей в лучистом теплообмене, то можно принять приведенный коэффициент черноты системы $\varepsilon_{пр}$ равным коэффициенту черноты $\varepsilon_т$ поверхности термоприемника [1]. В этом случае уравнение (6-2-2) примет вид:

$$Q_л = CF\left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{в.с}}{100}\right)^4\right], \qquad (6\text{-}2\text{-}3)$$

где C — коэффициент излучения поверхности термоприемника; $C = \sigma_0\varepsilon_т = 5{,}67\varepsilon_т$, Вт/(м$^2\cdot$К^4).

Решая уравнения (6-2-1) и (6-2-3), при учете, что $Q_к = Q_л$, получим формулу для определения поправки $\Delta t = t_ж - t_т$ или методической погрешности измерения температуры:

$$\Delta_{м.и} = t_т - t_ж = -\frac{C}{\alpha}\left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{в.с}}{100}\right)^4\right]. \qquad (6\text{-}2\text{-}4)$$

Из этой формулы следует, что методическая погрешность измерения пропорциональна коэффициенту излучения C поверхности термоприемника, и для ее уменьшения выгодно применять термоприемники с гладкой или лучше с блестящей поверхностью, так как коэффициент черноты $\varepsilon_т$, а следовательно, и излучения C для гладких поверхностей меньше, чем для шероховатых. Кроме того, очевидно, что погрешность измерения будет тем меньше, чем больше скорость потока газа, так как коэффициент теплоотдачи увеличивается с возрастанием скорости. Следует также иметь в виду, что методическая погрешность измерения температуры газовой среды будет тем меньше, чем меньше диаметр применяемого термоприемника.

---

[1] Формулы для определения приведенного коэффициента черноты системы приводятся в ряде работ [26, 27, 29].

Методическая погрешность измерения в большой степени зависит также и от температуры стенки трубы. Чтобы приблизить температуру внутренней стенки трубы к температуре газового потока, ее необходимо покрывать тепловой изоляцией *2* (см. рис. 6-2-1). При равных условиях погрешность измерения, обусловленная влиянием теплообмена излучением, тем больше, чем выше измеряемая температура газового потока.

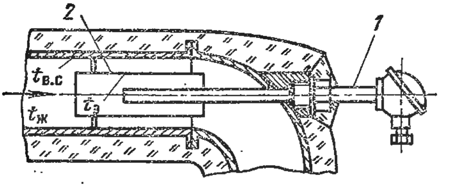


Рис. 6-2-2. Схема установки экранированного термоприемника в трубопроводе.

Погрешность измерения, обусловленную лучистым теплообменом, можно также значительно уменьшить посредством экранирующих устройств.

В качестве примера на рис. 6-2-2 показана схема установки экранированного термоприемника в трубопроводе, через который протекает газовый поток. На этой схеме термоприемник *1*, установленный вдоль оси трубопровода, находится внутри экрана *2*, изготовленного из листового металла. В этом случае теплообмен излучением происходит между термоприемником и поверхностью экрана, имеющего температуру $t_э$ более высокую, чем температура $t_{в.с}$ внутренней стенки трубы ($t_ж > t_э > t_{в.с}$).

Пользуясь теми же уравнениями, которые применялись при выводе выражения (6-2-4), получим формулы для определения приближенных значений методической погрешности измерения и температуры экрана:

$$t_т - t_ж = -\frac{\sigma_0 \varepsilon_{пр}}{\alpha}\left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_э}{100}\right)^4\right]; \qquad (6\text{-}2\text{-}5)$$

$$t_э = t_ж - \frac{\sigma_0 \varepsilon_{п.э}}{2\alpha_э}\left[\left(\frac{T_э}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{в.с}}{100}\right)^4\right], \qquad (6\text{-}2\text{-}6)$$

где $\varepsilon_{пр}$ — приведенный коэффициент черноты поверхности термоприемника и экрана; $\varepsilon_{п.э}$ — приведенный коэффициент черноты экрана и стенки трубы; $\alpha_э$ — коэффициент теплоотдачи от газа к экрану, Вт/(м^2·К); $T_э$ — температура экрана, К.

Остальные обозначения соответствуют принятым выше. Множитель 2 в знаменателе появляется вследствие того, что газ омывает стенки экрана с двух сторон. При составлении баланса тепла для экрана не учитывалось тепло, которое он получает от термоприемника вследствие теплообмена излучением.

Выводы, сделанные при рассмотрении уравнения (6-2-4) относительно влияния на погрешность измерения коэффициентов и температуры стенки трубы, сохраняют свою силу и в случае применения экранирующих устройств. Подробные сведения о расчете экранирующих устройств приводятся в ряде работ, например [27].

Вследствие того что значения некоторых величин, входящих в (6-2-4) и (6-2-5), могут быть определены расчетным путем лишь

приближенно, эти формулы не могут быть использованы для точного вычисления методической погрешности, но позволяют оценить порядок возможной методической погрешности измерения, а также разработать необходимые мероприятия, которые должны быть реализованы при создании и монтаже термоприемников, чтобы погрешности этого вида устранить или уменьшить. Точное значение методической погрешности измерения температуры газа за счет влияния теплообмена излучением можно определить только на основании экспериментальных данных.

Покажем на примерах, с какими значениями методической погрешности, обусловленной влиянием теплообмена излучением, приходится встречаться при измерении температуры горячего газового потока в промышленных условиях.

П р и м е р 1. Воздух, имеющий температуру $t_ж = 350°C$, протекает в коробе, покрытом тепловой изоляцией. Температура воздуха измеряется поперечно обтекаемым термометром сопротивления (ТСП-III) в защитном чехле диаметром $d = 0,021$ м. Защитный чехол изготовлен из стали марки 20. Коэффициент излучения поверхности защитного чехла $C = 4,66$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4).

Произведем подсчет возможных методических погрешностей измерения, обусловленных влиянием теплообмена излучением, для скоростей воздуха $v = 4$ и 10 м/с. Коэффициент кинематической вязкости воздуха $\nu = 57,33 \cdot 10^{-6}$ м^2/с. Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_ж = 4,64 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м · К). Число Прандтля $\Pr = 0,72$.

Определим значения числа Рейнольдса:
для $v = 4$ м/с

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu} = \frac{4 \cdot 0,021}{57,33 \cdot 10^{-6}} = 1,4652 \cdot 10^3 = 1,5 \cdot 10^3;$$

для $v = 10$ м/с

$$\mathrm{Re} = \frac{10 \cdot 0,021}{57,33 \cdot 10^{-6}} = 3,663 \cdot 10^3 = 3,7 \cdot 10^3.$$

Определим значение числа Нуссельта по формуле [29]

$$\mathrm{Nu} = 0,25 \mathrm{Re}^{0,6} \Pr^{0,38}.$$

Подставляя значения чисел Рейнольдса и Прандтля для $v = 4$ и 10 м/с, находим соответственно:

$$\mathrm{Nu} = 0,25\,(1,5 \cdot 10^3)^{0,6} \cdot 0,72^{0,38} = 17,498 = 17,5;$$

$$\mathrm{Nu} = 0,25\,(3,7 \cdot 10^3)^{0,6} \cdot 0,72^{0,38} = 30,332 = 30,3.$$

Пользуясь полученными данными, определим значения коэффициентов теплоотдачи для $v = 4$ и 10 м/с соответственно:

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda_ж}{d} = \frac{17,5 \cdot 0,0464}{0,021} = 38,667 = 38,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda_ж}{d} = \frac{30,3 \cdot 0,0464}{0,021} = 66,95 = 67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Температура $t_{в.с}$ внутренней стенки короба при скорости воздушного потока $v = 4$ и 10 м/с соответственно равна $t_{в.с} = 336$ и 348°C, или $T_{в.с} = 609$ и 621 К. Пользуясь уравнением (6-2-4), получаем при скорости воздушного потока:

v, м/с	4;	10
$t_т$, °C	342,6;	349,2
$t_т - t_ж$, °C	−7,4;	−0,8

Если воздуховод не будет иметь тепловой изоляции на участке, где установлен термометр сопротивления, то температура $t_{в.с}$ при скоростях воздуха $v = 4$ и 10 м/с будет соответственно равна 281 и 302°С ($T_{в.с} = 554$ и 575 К). В этом случае методическая погрешность измерения, обусловленная влиянием теплообмена излучением, будет составлять:

v, м/с	4;	10
$t_т$, °С	317;	333
$t_т - t_ж$, °С	—33;	—17

Пример 2. Водяной пар, имеющий температуру $t_ж = 570$°С и давление $p = 140$ кгс/см² (14 МПа), протекает в теплоизолированном паропроводе $D_{20} = 233$ мм. Температура пара измеряется поперечно обтекаемым термоэлектрическим термометром (ТХА-284) в защитном чехле из стали марки 1Х18Н9Т, средний диаметр которого равен $d = 0{,}018$ м. Коэффициент излучения поверхности защитного чехла $C = 4{,}54$ Вт/(м² · К⁴). Как показывает подсчет температура внутренней стенки паропровода $t_{в.с} = 568$°С ($T_{в.с} = 841$ К).

Скорость потока пара $v = 30$ м/с. Коэффициент кинематической вязкости водяного пара $\nu = 0{,}853 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплопроводности водяного пара $\lambda_ж = 90{,}4 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К). Число Прандтля для водяного пара $\mathrm{Pr} = 0{,}945$.

Определим значение числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu} = \frac{30 \cdot 0{,}018}{0{,}853 \cdot 10^{-6}} = 6{,}33 \cdot 10^5.$$

Определим значение числа Нуссельта [29]:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}226\mathrm{Re}^{0,6}\mathrm{Pr}^{0,4} = 0{,}226 \cdot (6{,}33 \cdot 10^5)^{0,6} (0{,}945)^{0,4} = 665.$$

Подсчитаем значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda_ж}{d} = \frac{665 \cdot 90{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}018} = 3340 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Пользуясь формулой (6-2-4), находим методическую погрешность измерения, обусловленную влиянием теплообмена излучением $t_т - t_ж = -0{,}1$°С или $t_т = 569{,}9$°С[1].

Из рассмотренных примеров следует, что методические погрешности измерения, обусловленные влиянием теплообмена излучением, могут быть сведены к минимуму, если наряду с общей тепловой изоляцией короба или трубопровода имеется также изоляция на участке, где закреплен в бобышке поперечно обтекаемый термоприемник, если скорость газового потока велика ($w > 10$ м/с), если применен термоприемник с защитной трубкой возможно меньшего диаметра. Эффективной мерой снижения рассматриваемой погрешности является также применение экранирующего устройства.

6-3. Методические погрешности при измерении температуры среды, обусловленные отводом или подводом тепла по термоприемнику

При измерении температуры жидкости или газа (пара) термоприемник устанавливают в трубопроводе, воздуховоде, газоходе или в других местах технологического оборудования и закрепляют его тем или иным способом в их стенках. При этом температура мест закрепления термоприемника обычно отличается от температуры

---

[1] В большинстве случаев скорость потока свежего пара составляет 35—45 м/с, поэтому методическая погрешность из-за теплообмена излучением будет значительно меньше [28].

среды. Вследствие этого распределение температур по длине термоприемника будет неравномерным и из-за теплоотвода (или теплоподвода) температура рабочей части термоприемника может отличаться от действительной температуры среды.

Следует иметь в виду, что методическую погрешность, обусловленную теплопроводностью, так же как и погрешность из-за лучистого теплообмена, с достаточной степенью точности можно определить только экспериментальным путем. Порядок возможной погрешности измерения обычно определяют расчетным путем при допущении, что термоприемник представляет собой однородный стержень (трубу) длиной l, один конец которого закреплен в стенке, например, трубопровода (рис. 6-3-1). Температура $t_{о.т}$ у основания такого идеализированного термоприемника, т. е. в месте соединения его со стенкой трубопровода, отличается от температуры $t_т$ рабочей части термоприемника ($x = 0$), а вместе с тем и от температуры $t_ж$ среды. Температура $t_{о.т}$ приближенно принимается равной температуре $t_{н.с}$ наружной стенки трубопровода. Предполагается, что в каждом поперечном сечении идеализированного термоприемника распределение температур равномерное и температура $t\ (x)$ термоприемника изменяется только вдоль его оси.

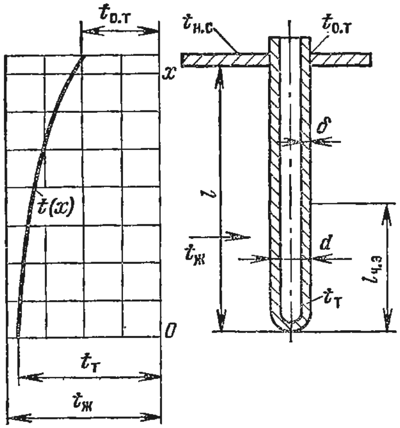


Рис. 6-3-1. Схема установки идеализированного термоприемника без выступающей части.

Уравнение, описывающее изменение температуры такого идеализированного термоприемника, имеет вид:

$$\frac{d^2 t\ (x)}{dx^2} = m^2\, [t_ж - t\ (x)], \qquad (6\text{-}3\text{-}1)$$

где

$$m = \sqrt{\frac{\pi\, d\alpha}{\lambda_м f}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_м \delta}}; \qquad (6\text{-}3\text{-}2)$$

здесь d — наружный диаметр термоприемника, м; α — коэффициент теплоотдачи от среды к термоприемнику, Вт/(м$^2\cdot$К); $\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности материала термоприемника (трубки), Вт/(м$^2\cdot$К); f — площадь поперечного сечения термоприемника ($f = \pi d\delta$, где δ — толщина стенки термоприемника, м), м^2.

Количеством тепла, поступающего через торец термоприемника при $x = 0$, обычно пренебрегают. В этом случае

$$\left.\frac{dt\ (x)}{dx}\right|_{x=0} = 0.$$

Решая уравнение (6-3-1) с учетом граничных условий и принимая, что комплекс m^2 не зависит от температуры и координаты x, получаем [1]:

$$\frac{t_ж - t(x)}{t_ж - t_{о.т}} = \frac{\text{ch}(mx)}{\text{ch}(ml)}. \quad (6\text{-}3\text{-}3)$$

Из этого выражения при $x = 0$ получим формулу для определения поправки $\Delta t = t_ж - t_т$ или методической погрешности $\Delta_{м.т}$ измерения температуры:

$$\Delta_{м.т} = t_т - t_ж = -\frac{t_ж - t_{о.т}}{\text{ch}(lm)}, \quad (6\text{-}3\text{-}4)$$

где $t_ж$, $t_т$ и $t_{о.т}$ — соответственно температура среды, рабочей части термоприемника ($x = 0$) и в месте соединения его со стенкой трубы ($x = l$), °С; l — длина погруженной части термоприемника, м; m — согласно формуле (6-3-2)

$$m = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_м \delta}}.$$

Температура $t_т$ термоприемника при $x = 0$ может быть принята с некоторым приближением равной температуре рабочего конца термоэлектрического термометра или резервуара жидкостного термометра. При измерении же температуры термометром сопротивления или манометрическим термометром, вследствие больших размеров их чувствительных элементов, средняя температура $t'_т$ рабочей части этих термоприемников будет меньше, чем температура $t_т$ при $x = 0$.

Если чувствительный элемент термоприемника (например, термометра сопротивления) расположен на некоторой длине $l_{ч.э}$ (рис. 6-3-1), то средняя температура $t'_т$ его рабочей части, а вместе с тем и методическая погрешность, определяется на основе выражения (6-3-3) по формуле [27]

$$\Delta_{м.т} = t'_т - t_ж = -\frac{t_ж - t_{о.т}}{\text{ch}(lm)} \cdot \frac{\text{sh}(lmb)}{lmb}, \quad (6\text{-}3\text{-}5)$$

где $b = \frac{l_{ч.э}}{l}$ — относительная длина участка осреднения температуры.

Если термоприемник омывается потоком среды продольно, то методическая погрешность для всех типов термоприемников определяется по формуле (6-3-4).

Уравнения (6-3-4) и (6-3-5) не учитывают теплообмен излучением, влияние которого на точность измерения было рассмотрено выше. При определении методической погрешности измерения, обусловленной теплопроводностью, предполагается, что температура рабочей части идеализированного термоприемника равна температуре чувствительного элемента реального термоприемника. Чтобы

[1] Подробное решение уравнения (6-3-1) рассматривается в [27, 29].

это условие выполнялось, необходимо в реальных термоприемниках обеспечить хороший тепловой контакт чувствительного элемента термометра сопротивления, рабочего конца термоэлектрического термометра, резервуара жидкостного термометра или термобаллона манометрического термометра с рабочей частью защитной гильзы.

Методическая погрешность измерения, как видно из уравнений (6-3-4) и (6-3-5), может быть уменьшена путем повышения температуры $t_{о.т}$. Для этого необходимо трубопровод и место соединения термоприемника с его стенкой покрывать тепловой изоляцией. Погрешность измерения будет также уменьшаться с увеличением коэффициента теплоотдачи и глубины погружения термоприемника. Кроме того, погрешность измерения будет тем меньше, чем меньше коэффициент теплопроводности материала защитной трубки термоприемника и его элементов. При выборе способа установки термоприемника следует учитывать, что коэффициент теплоотдачи больше при поперечном омывании термоприемника, чем при наклонном и продольном омывании.

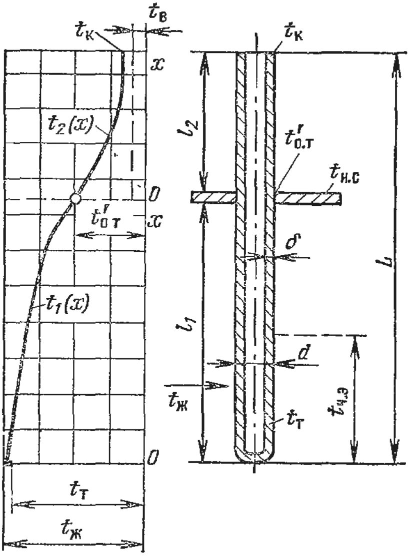


Рис. 6-3-2. Схема установки идеализированного термоприемника при наличии выступающей части.

На увеличение методической погрешности измерения температуры оказывает также существенное влияние выступающая наружу часть термоприемника. Для приближенной оценки возможной методической погрешности измерения при наличии выступающей части термоприемника исходят, как и в первом случае, из допущения, что термоприемник представляет собой однородный стержень (трубу) длиною $L = l_1 + l_2$ (l_1 и l_2 — соответственно длина погруженной и выступающей частей идеализированного термоприемника, м) (рис. 6-3-2). Распределение температур $t_1(x)$ и $t_2(x)$ вдоль такого идеализированного термоприемника характеризуется кривыми, показанными на рис. 6-3-2. Уравнения, описывающие изменение температуры на участках l_1 и l_2 этого термоприемника, можно записать в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2 t_1(x)}{dx^2} - m_1^2 [t_ж - t_1(x)] = 0; \\ \frac{d^2 t_2(x)}{dx^2} - m_2^2 [t_в - t_2(x)] = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}3\text{-}6)$$

Подробное решение этой задачи приведено в ряде работ [26, 31]. Уравнение, позволяющее определить температуру $t'_{о.т}$ у основания идеализированного термоприемника при наличии выступающей части его, имеет вид:

$$t_ж - t'_{о.т} = \frac{t_ж - t_в}{1 + \frac{m_1 \operatorname{th}(l_1 m_1)}{m_2 \operatorname{th}(l_2 m_2)}}, \qquad (6\text{-}3\text{-}7)$$

где $t_в$ — температура воздуха, окружающего выступающую часть термоприемника;

$$m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_{м1} f_1}} = \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{м1} \delta_1}}; \quad m_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_{м2} f_2}} = \sqrt{\frac{\alpha_2}{\lambda_{м2} \delta_2}}; \qquad (6\text{-}3\text{-}8)$$

здесь α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи в средах с температурами $t_ж$ и $t_в$. Остальные обозначения соответствуют принятым выше; величины, имеющие индексы «1», относятся к погруженной части термоприемника, а «2» — к выступающей его части.

Пользуясь значением $t'_{о.т}$, можно вычислить методическую погрешность измерения температуры $t_ж$ по формуле

$$t_т - t_ж = -\frac{t_ж - t'_{о.т}}{\operatorname{ch}(l_1 m_1)}, \qquad (6\text{-}3\text{-}9)$$

которая с учетом уравнения (6-3-7) принимает вид:

$$t_т - t_ж = -\frac{t_ж - t_в}{1 + \frac{m_1 \operatorname{th}(l_1 m_1)}{m_2 \operatorname{th}(l_2 m_2)}} \frac{1}{\operatorname{ch}(l_1 m_1)}. \qquad (6\text{-}3\text{-}10)$$

Если температура измеряется с помощью термометра сопротивления, чувствительный элемент которого расположен на некоторой длине $l_{ч.э}$ (рис. 6-3-2), то на основании уравнений (6-3-5) и (6-3-7) методическая погрешность определяется по формуле

$$t'_т - t_ж = -\frac{t_ж - t_в}{1 + \frac{m_1 \operatorname{th}(l_1 m_1)}{m_2 \operatorname{th}(l_2 m_2)}} \frac{1}{\operatorname{ch}(l_1 m_1)} \frac{\operatorname{sh}(l_{ч.э} m_1)}{l_{ч.э} m_1}. \qquad (6\text{-}3\text{-}11)$$

Вычислив значение $t'_{о.т}$, можно определить температуру $t_к$ конца выступающей части (головки) термоприемника по формуле

$$t_к - t_в = \frac{t'_{о.т} - t_в}{\operatorname{ch}(l_2 m_2)}, \qquad (6\text{-}3\text{-}12)$$

преобразовав которую и подставив значение $t'_{о,т}$ (6-3-7), получим:

$$t_к - t_в = \frac{t_ж - t_в}{1 + \frac{m_2 \operatorname{th}(l_2 m_2)}{m_1 \operatorname{th}(l_1 m_1)}} \frac{1}{\operatorname{ch}(l_2 m_2)}. \qquad (6\text{-}3\text{-}13)$$

В рассматриваемом случае погрешность измерения будет тем меньше, чем короче выступающая часть l_2, чем больше отношение l_1/l_2 и α_1/α_2, а также чем меньшее количество тепла рассеивается выступающей частью термоприемника. Для уменьшения методиче-

ской погрешности измерения температуры $t_ж$ выступающую часть термоприемника частично покрывают теплоизолирующим материалом.

При рассмотрении влияния на погрешность измерения выступающей части термоприемника предполагалось, что в месте соединения его со стенкой, разделяющей газ (жидкость) и наружный воздух, отсутствует теплообмен. Для этих условий и было получено выражение (6-3-7). В реальных условиях такой случай не всегда возможен. При установке термоприемник обычно закрепляют тем или иным способом либо на металлической стенке, либо в стенках из материалов (кирпич и т. п.) с малым коэффициентом теплопроводности.

Если при определении методической погрешности температура $t_{н.с}$ стенки, в месте соединения которой с термоприемником происходит теплообмен, будет равна подсчитанной температуре $t'_{о.т}$ согласно выражению (6-3-7), то полученное значение погрешности отвечает действительности. Если $t'_{о.т} > t_{н.с}$, то по сравнению с подсчетом погрешность будет больше, так как при металлических стенках значение $t'_{о.т}$ приближается к температуре $t_{н.с}$, и вместе с тем увеличивается теплоотвод. Если же вследствие большого теплоотвода через выступающую часть термоприемника, закрепленного, например, в кирпичной стенке, $t'_{о.т} < t_{н.с}$, то имеет место противоположное явление. Таким образом, крепление термоприемника в стенке может понизить температуру $t'_{о.т}$ у его основания или повысить ее, и поэтому погрешность измерения будет также либо увеличиваться, либо уменьшаться. В последнем случае не рекомендуется в месте крепления термоприемника ставить теплоизолирующую прокладку.

При измерении температуры газа в ряде случаев можно температуру $t'_{о.т}$ в месте крепления термоприемника повысить, а следовательно, уменьшить и погрешность измерения от теплоотвода. В этом случае вводят в среду газа закладные трубы или какие-либо металлические поверхности и соединяют их с местом крепления термоприемника.

Приведенные выше формулы для определения методической погрешности за счет теплопроводности могут быть использованы также для учета возможной погрешности, обусловленной теплоотводом (или теплоподводом) по термоэлектродам термоэлектрических термометров и выводным проводникам термометров сопротивления. При необходимости влияние теплоотвода (или теплоподвода) по термоэлектродам или выводным проводникам можно учесть путем соответствующего увеличения толщины стенки защитной трубки.

Ниже приведены примеры, дающие представление о возможных значениях методических погрешностей, обусловленных теплоотводом по термоприемнику.

Пример 1. Воздух, имеющий температуру $t_ж = 350°C$, протекает в теплоизолированном металлическом коробе. Температура воздуха измеряется поперечно обтекаемым термометром сопротивления ТСП-III в защитном чехле диаметром $d = 0{,}021$ м с толщиной стенки $\delta = 0{,}004$ м. Защитный чехол выполнен из

стали марки 20. Коэффициент теплопроводности материала защитного чехла $\lambda_м = 44,6$ Вт/(м · К).

Скорость потока воздуха $v = 4$ и 10 м/с. Коэффициент кинематической вязкости воздуха $\nu = 57,33 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_ж = 0,0464$ Вт/(м · К).

Глубина погружения термометра сопротивления в первом случае равна 0,35 м, а во втором 0,6 м. Длина чувствительного элемента термометра $l_{ч.э} = 0,094$ м. Длина выступающей части термометра не учитывается. Как показывает подсчет, температура у основания термометра $t_{о.т}$ для $v = 4$ и 10 м/с соответственно 335 и 346°С. Коэффициенты теплоотдачи принимаются равными значениям, подсчитанным в примере 1 (§ 6-2): $\alpha_1 = 38,7$ Вт/(м² · К) при $v = 4$ м/с и $\alpha_1 = 67$ Вт/(м² · К) при $v = 10$ м/с.

Пользуясь формулой (6-3-5)

$$\Delta_{м.т} = t'_т - t_ж = -\frac{t_ж - t_{о.т}}{\mathrm{ch}\,(lm)} \frac{\mathrm{sh}\,(l_{ч.э} m)}{l_{ч.э} m},$$

находим методическую погрешность измерения:

1) при $l = 0,35$ м и $v = 4$ м/с

$$t'_т - t_ж = -\frac{350 - 335}{86,391} \frac{1,870}{1,384} = -0,234 \approx -0,2°С;$$

2) при $l = 0,6$ м и $v = 4$ м/с

$$t'_т - t_ж = -\frac{350 - 335}{3418,145} \frac{1,870}{1,384} = -0,006°С;$$

3) при $l = 0,35$ м и $v = 10$ м/с

$$t'_т - t_ж = -\frac{350 - 346}{440,04} \frac{3,011}{1,822} = -0,02°С;$$

4) при $l = 0,6$ м и $v = 10$ м/с

$$t'_т - t_ж = -\frac{350 - 346}{55660,85} \frac{3,011}{1,822} = -7,2 \cdot 10^{-5}°С.$$

Если короб, по которому протекает воздух, не будет иметь тепловой изоляции на участке, где установлен термометр сопротивления, то температура $t_{о.т}$ у основания термометра при скоростях воздуха $v = 4$ и 10 м/с будет соответственно равна 280 и 300°С. При этом, как показывают подсчеты, методическая погрешность измерения, обусловленная теплоотводом, будет равна:

v, м/с	4;	4;	10;	10
l, м	0,35;	0,6;	0,35;	0,6
$t'_т - t_ж$, °С	−1,1;	−0,03;	−0,2;	−0,001

Пример 2. Водяной пар, имеющий температуру $t_ж = 570$°С и давление $P = 140$ кгс/см² (14 МПа), протекает в теплоизолированном паропроводе $D_{20} = 233$ мм. Температура пара измеряется поперечно обтекаемым термоэлектрическим термометром ТХА-284 в защитной гильзе, средний диаметр которой равен $d = 0,018$ м. Толщина стенки защитного чехла $\delta = 0,006$ м. Защитная гильза изготовлена из стали марки 1Х18Н9Т. Коэффициент теплопроводности материала защитного чехла $\lambda_м = 23,61$ Вт/(м · К).

Скорость потока пара $v = 30$ м/с. Коэффициент кинематической вязкости водяного пара $\nu = 0,853 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коэффициент теплопроводности водяного пара $\lambda_ж = 90,4 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К). Число Прандтля для водяного пара Pr = 0,945. Глубина погружения термоэлектрического термометра l принимается равной 0,06 и —0,095 м. Длина выступающей части термоэлектрического термометра не учитывается. Температура $t_{о.т}$ принимается равной 567 и 560°С. Коэффициент теплоотдачи принимается равным значению, подсчитанному в примере 2 (§ 6-2): $\alpha = 3340$ Вт/(м² · К).

Пользуясь формулой (6-3-4), подсчитаем методическую погрешность измерения, обусловленную теплоотводом:

1) при $l = 0{,}06$ м и $t_{о.т} = 567°C$

$$t_т - t_ж = -\frac{570-567}{4851} = -0{,}6 \cdot 10^{-3}\,°C;$$

2) при $l = 0{,}06$ м и $t_{о.т} = 560°C$

$$t_т - t_ж = -\frac{570-560}{4851} = -0{,}2 \cdot 10^{-2}\,°C;$$

3) при $l = 0{,}95$ м и $t_{о.т} = 567°C$

$$t_т - t_ж = -\frac{570-567}{1\,031\,838} \approx 0°C;$$

4) при $l = 0{,}095$ м и $t_{о.т} = 560°C$

$$t_т - t_ж = -\frac{570-560}{1\,031\,838} \approx 0°C.$$

Из рассмотренных примеров видно, что методическая погрешность, обусловленная теплопроводностью, с увеличением глубины погружения термоприемника и скорости газового потока значительно уменьшается. При выборе необходимой глубины погружения термоприемника в среду, температура которой измеряется, можно не считаться с этой погрешностью.

6-4. Установка термоприемников при измерении температуры газов, пара и жидкостей

Рассмотрим примеры способов установки термоприемников, обеспечивающих ограничение методических погрешностей измерения, обусловленных влиянием теплообмена излучением и теплоотвода.

Примером использования экранированных термоприемников является измерение температуры воздуха в производственных помещениях и наружного воздуха.

Для измерения температуры воздуха в производственных помещениях применяют медные термометры сопротивления типа ТСМ-6114 (рис. 6-4-1), снабженные защитной арматурой и экраном с устроенными в нем зазорами. Эти термометры применяют также для измерения температуры наружного воздуха. В этом случае их устанавливают в специальном ящике, который защищает термометр от воздействия радиации солнца и других влияющих факторов.

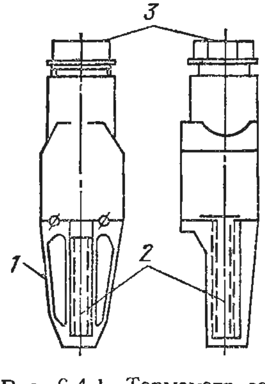


Рис. 6-4-1. Термометр сопротивления типа ТСМ-6114.

1 — защитная арматура — экран; *2* — защитный чехол чувствительного элемента термометра; *3* — штуцер для ввода проводов.

Во многих отраслях промышленности получили распространение технические ртутные термометры для измерения температуры и электроконтактные ртутные термометры для целей сигнализации температуры. Эти термометры, устанавливаемые непосредственно на трубопроводах, агрегатах, аппаратах и т. п., во избежание поломок заключаются

в защитные металлические оправы различных типов. Например, бывают оправы, допускающие непосредственное соприкосновение резервуара термометра со средой, температуру которой измеряют. Оправы такого типа применяются при давлениях среды, близких к атмосферному. При давлении среды, превышающем атмосферное, применяют оправы, изолирующие резервуар термометра от непосредственного соприкосновения со средой. Правильность показаний термометров, заключенных в оправах, зависит не только от качества самого термометра, но и от устройства оправы, и от способа монтажа термометра в оправе. Оправа должна обеспечивать необходимую глубину погружения нижней части термометра в среду, температура которой измеряется.

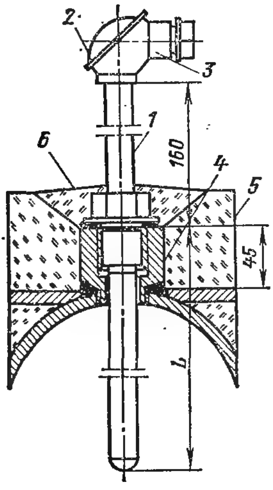


Рис. 6-4-2. Вертикальная установка термоприемника на металлической стенке или трубопроводе.

1 — термоприемник; *2* — головка; *3* — штуцер для ввода проводов; *4* — бобышка; *5* — изоляция; *6* — легкосиимаемый слой изоляции.

При измерении стационарных температур для улучшения теплопередачи от защитной оправы (гильзы) к теплочувствительной части термометра гильзу заполняют небольшим количеством масла, если она находится в вертикальном положении и измеряемая температура не более 200°С, или на резервуар надевают специальный металлический наконечник. Масло в гильзу рекомендуется наливать так, чтобы в него была погружена нижняя часть термометра примерно на 30 мм, так как при большом количестве масла возникают конвекционные потоки, отводящие тепло и охлаждающие вследствие этого резервуар термометра.

Для повышения точности измерения температуры необходимо обеспечивать достаточную глубину погружения термоприемника в среду, температура которой измеряется.

При измерении температуры в газоходах, воздуховодах и трубопроводах большого диаметра может быть обеспечена необходимая глубина погружения термоприемника. В качестве примера на рис. 6-4-2 показана вертикальная установка термометра сопротивления или термоэлектрического термометра на металлической стенке или трубопроводе $D_н \geqslant 1020$ мм и $p_у \leqslant 10$ кгс/см² (1 МПа). Такая установка при монтажной длине термоприемника $L \geqslant 600$ мм и наличии изоляции позволяет пренебречь методической погрешностью из-за теплоотвода (§ 6-3). Методическую погрешность за счет лучистого теплообмена в этом случае следует оценивать с учетом влияния теплообмена излучением не только между термоприемником и стенкой канала, но и окружающими его телами, если таковые имеются.

В тех случаях, когда по тем или иным причинам вертикальная установка термоприемника не может быть осуществлена, термоприемник может быть установлен горизонтально. Для большей надежности при горизонтальном монтаже термоприемника на металлической стенке или трубопроводе ($D_н \geqslant 1020$ мм) он устанавливается в закладной трубе (рис. 6-4-3).

Рассмотренные способы установки термометров сопротивления или термоэлектрических термометров применяют также при их монтаже на металлической стенке или трубопроводе ($D_н \geqslant 1020$ мм) с внутренней кирпичной кладкой.

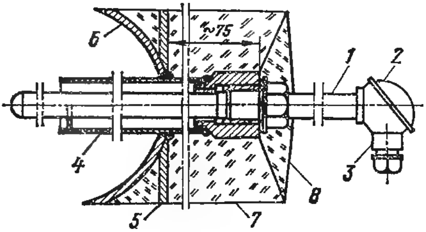


Рис. 6-4-3. Горизонтальная установка термоприемника на металлической стенке или трубопроводе.

1 — термоприемник; 2 — головка термоприемника; 3 — штуцер для ввода проводов; 4 — труба закладная с бобышкой; 5 — металлическая стенка; 6 — трубопровод; 7 — изоляция; 8 — легкоснимаемый слой изоляции.

На рис. 6-4-4 показана горизонтальная установка термоэлектрического термометра без штуцера в кирпичной кладке для измерения температуры газа ($p_у \leqslant 2,5$ кгс/см²). При вертикальной установке термоэлектрического термометра без штуцера в кирпичной кладке закладная труба с бобышкой монтируется заподлицо с внутренней стенкой. В этом случае опорную пластинку 5 ставить не надо.

При измерении температуры в трубопроводах с наружным диаметром $D_н = 57 \div 133$ мм удобна установка термоприемника, пока-

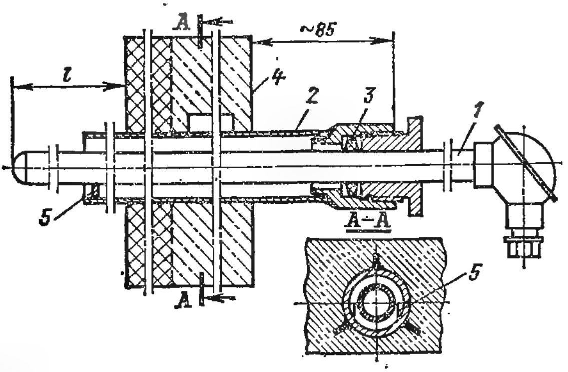


Рис. 6-4-4. Горизонтальная установка термоэлектрического термометра без штуцера в кирпичной кладке.

1 — термоэлектрический термометр; 2 — труба закладная с бобышкой; 3 — асбесто-графитная набивка; 4 — кирпичная кладка; 5 — опорная пластина.

занная схематично на рис. 6-4-5. Этот способ установки может быть рекомендован для различных термоприемников. Если внутренний диаметр трубопровода имеет недостаточный размер, то термоприемник может быть установлен наклонно к оси трубопровода (рис. 6-4-6, *а*).

При измерении температуры среды в трубопроводах, позволяющих обеспечить необходимую глубину погружения термоприемника,

он может быть установлен радиально (рис. 6-4-6, *б*). При этом следует помнить, что при установке термометра сопротивления (или термобаллона манометрического термометра) радиально или наклонно необходимо, чтобы середина его чувствительного элемента совпадала с осью трубопровода. Напомним также, что при выборе способа установки термоприемника необходимо учитывать, что коэффициент теплоотдачи больше при поперечном омывании термоприемника (рис. 6-4-6, *б*), чем при наклонном (рис. 6-4-6, *а*) и продольном (рис. 6-4-5) омывании.

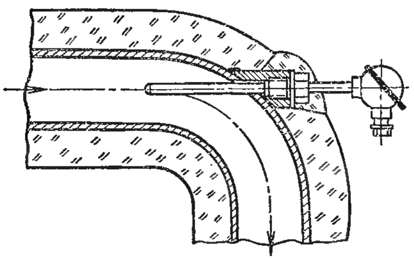


Рис. 6-4-5. Схема установки термоприемника вдоль оси трубы.

Для измерения температуры перегретого водяного пара высоких параметров применяют малоинерционные термоэлектрические термометры с конической защитной гильзой. Схема установки такого термоприемника на паропроводе показана на рис. 6-4-7. В целях большей надежности работы термоэлектрический термометр погружен не до центра трубопровода. При таком способе установки, как показывают подсчеты (§ 6-2 и 6-3), методическая погрешность, обусловленная влиянием теплообмена излучением и теплоотвода, мала и ею можно пренебречь.

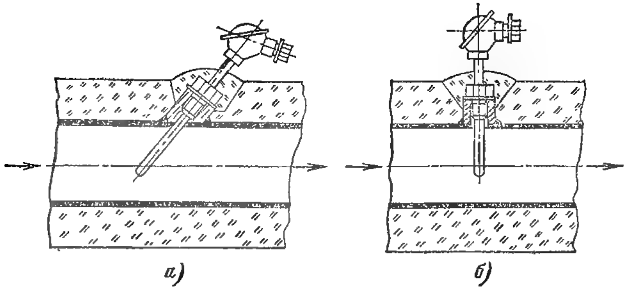


Рис. 6-4-6. Схема установки термоприемника наклонно к оси трубы (*а*) и радиально (*б*).

При измерении температуры среды в трубопроводах малого диаметра ($D_н < 57$ мм) необходимо в него вделать расширитель для установки термоприемника [1].

При измерении температуры жидкостей необходимо соблюдать описанные выше способы повышения точности измерения температуры газов и пара. Однако условия при измерении температуры жид-

[1] Установочные чертежи для монтажа термоприемников на трубопроводах с расширителями см. «Отраслевые нормали МВН 1505-63 и 1521-63».

костей более благоприятны, чем при измерении температуры газа или пара, так как для жидкостей влияние теплообмена излучением можно не учитывать. Кроме того, коэффициент теплоотдачи для жидкостей значителен, поэтому методическая погрешность, обусловленная теплоотводом, при правильной установке термоприемника мала и ею можно пренебречь.

На рис. 6-4-8 показана схема установки термометра сопротивления на трубопроводе для измерения температуры питательной воды.

Когда скорость газового потока и коэффициент теплоотдачи малы, то при помощи рассмотренных выше пассивных способов не всегда возможно достигнуть удовлетворительных результатов.

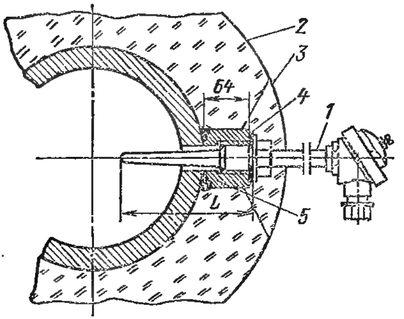


Рис. 6-4-7. Схема установки термоэлектрического термометра на трубопроводе для измерения температуры перегретого водяного пара.

1 — термоэлектрический термометр; *2* — изоляция; *3* — легкоснимаемый изоляционный слой; *4* — прокладка; *5* — бобышка; *L* — монтажная длина.

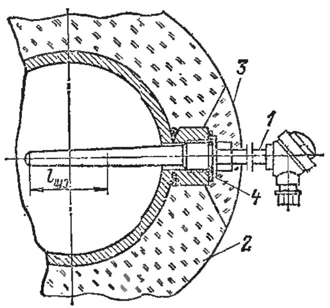


Рис. 6-4-8. Схема установки термометра сопротивления для измерения температуры питательной воды.

1 — термометр сопротивления; *2* — изоляция; *3* — легкоснимаемый изоляционный слой; *4* — прокладка; $l_{ч.э}$ — длина чувствительного элемента термометра.

В таких случаях, например при измерении температуры газа в газоходе перед пароперегревателем парогенератора, повышают коэффициент теплоотдачи до такого значения, при котором методической погрешностью, обусловленной лучистым теплообменом, можно пренебречь благодаря искусственному увеличению скорости газа, омывающего термоприемник.

Этот способ искусственного повышения скорости газа приводит к конструкции термоэлектрического термометра с отсосом (рис. 6-4-9). Термоэлектрический термометр *1* вставлен в трубу *2*, покрытую тепловой изоляцией, последняя, в свою очередь, окружена чехлом *3*. Отсос газа производится через трубу *4* с помощью эжектора или другим путем.

Газ протекает с большой скоростью (80—120 м/с) через трубу *2*, что увеличивает коэффициент теплоотдачи от газа к термоэлектрическому термометру. Изоляция трубы *2* преследует цель повышения

ее температуры для того, чтобы тепловые потери термоприемника от лучеиспускания к стенкам труб были минимальными.

Надо отметить, что температуру газа до и после пароперегревателя в современных парогенераторах нельзя измерить с достаточной точностью при помощи обычных стандартных термоэлектрических термометров вследствие значительной методической погрешности из-за теплообмена излучением. В этом случае необходимо применять экранированные термоприемники.

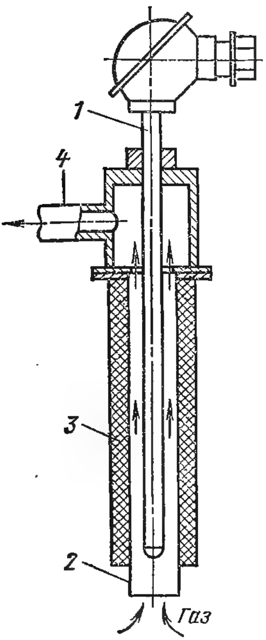


Рис. 6-4-9. Схема устройства термоэлектрического термометра с отсосом.

Отметим, что применение термоэлектрических термометров с отсосом требует достаточно мощных отсасывающих устройств. Кроме того, присутствие в газах пыли, золы сильно затрудняет отсос при длительной работе, вызывая загрязнение отсосных каналов. Поэтому термоэлектрические термометры с отсосом применяют главным образом при проведении испытаний парогенераторов.

6-5. Измерение температуры газовых потоков большой скорости

Измерению температуры газа, движущегося с большой скоростью, уделяется большое внимание при проведении исследований процессов тепломассообмена и в области газовой динамики, а также связанных с созданием современных двигателей, самолетов и т. п. [32, 33].

При измерении температуры газового потока большой скорости, кроме рассмотренных выше методических погрешностей, необходимо учитывать как влияющий фактор частичное торможение потока в зоне расположения термоприемника, вызывающее дополнительный нагрев рабочей части термоприемника. Нагрев термоприемника и его температура зависят не только от физических свойств и состояния движения среды, но также и от собственных свойств термоприемника.

Газ, движущийся с некоторой скоростью v и имеющий температуру T, обладает кинетической энергией, которая в расчете на единицу его массы равна $v^2/2$. При торможении газа происходит уменьшение кинетической энергии, т. е. преобразование ее в тепловую. При этом энтальпия газа изменяется и его температура возрастает. Если газ полностью затормозить без теплообмена с окружающей средой, то температура газа при обращении его скорости в нуль возрастет до значения T_0. Эта температура адиабатно заторможенного газа, называемая в отличие от первоначальной термо-

динамической температуры T свободно текущего газа температурой торможения, может быть определена на основании закона сохранения энергии

$$\frac{v^2}{2} = c_p (T_0 - T) = c_p \theta \tag{6-5-1}$$

или

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2c_p}, \tag{6-5-2}$$

где c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); θ — повышение температуры, К.

Как следует из приведенного уравнения, изменение термодинамической температуры равно θ, т. е. изменение энтальпии находится в строгом соответствии с изменением кинетической энергии. Пользуясь уравнением (6-5-1), можно определить повышение температуры θ; например, для воздуха значение θ составляет 1,2; 5; 20; 500 К соответственно при скоростях 50, 100, 200 и 1000 м/с, а для перегретого водяного пара равно 0,4 К при $v = 50$ м/с. При $v = 50$ м/с значение θ сравнительно мало, вот почему эту скорость при практическом измерении температуры обычно считают верхней границей области «умеренных» скоростей.

При обтекании твердого тела, введенного в поток большой скорости, полное торможение газа может происходить при условии, что он набегает на тело в направлении, нормальном к его поверхности. В этом случае торможение происходит в форме процесса, для которого вязкостные силы являются неопределяющими, так как нормальная составляющая скорости будет обращаться на поверхности тела всегда в нуль, независимо от степени идеализации свойств среды. При таких условиях торможение представляет процесс адиабатического сжатия. Реально такие условия могут иметь место в критической точке, т. е. в точке разветвления струи газа. В отдельных точках у поверхности тела торможение газа происходит под действием сил трения, и при этом не полное.

Выделяющаяся в пограничном слое тепловая энергия отводится за счет конвективного переноса и теплопроводности. Отвод будет иметь место и в том случае, когда стенка тела (например, идеального термоприемника) обладает нулевой теплопроводностью (или теплоизолирована) и теплоотдача между идеальным термоприемником и газом отсутствует. В этом случае торможение газа происходит также неполное, а следовательно, температура $T_р$ термоприемника будет меньше температуры торможения T_0. Эту температуру $T_р$, превышающую T, принято называть в отличие от температуры торможения T_0 равновесной температурой.

Для количественной оценки этого сложного процесса вводится понятие коэффициента восстановления, характеризующего степень восстановления энтальпии при торможении движущегося газа на поверхности. Согласно определению

$$r = \frac{T_р - T}{T_0 - T} = \frac{T_р - T}{v^2/2c_p}. \tag{6-5-3}$$

Подставив в (6-5-3) выражение для T из (6-5-2), получим:

$$r = 1 - \frac{2c_p (T_0 - T_р)}{v^2}. \qquad (6\text{-}5\text{-}4)$$

Выражение (6-5-3) можно представить в следующем виде:

$$\frac{T_р}{T} = 1 + r\frac{k-1}{2}\text{M}^2, \qquad (6\text{-}5\text{-}5)$$

где k — показатель адиабаты ($k = c_p/c_v$); М — число Маха:

$$\text{M} = \frac{v}{a}; \qquad (6\text{-}5\text{-}6)$$

здесь a — скорость распространения звука в газовом потоке при термодинамической температуре T, м/с:

$$a = \sqrt{kRT}, \qquad (6\text{-}5\text{-}7)$$

где R — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Следует иметь в виду, что коэффициент восстановления и температура $T_р$ в различных точках поверхности обтекаемого тела будут различаться, так как значения скорости на внешней стороне пограничного слоя могут быть не одинаковыми.

Коэффициент восстановления r зависит от профиля омываемого тела, режима течения, физических свойств среды и других факторов. Для продольно обтекаемой нетеплопроводной пластины теоретически установлено, что при ламинарном течении в пограничном слое коэффициент восстановления определяется простым выражением $r = \sqrt{\text{Pr}}$, справедливым в достаточно широком интервале значений числа Прандтля ($\text{Pr} = 0{,}5 \div 10$). Для воздуха при ламинарном режиме $r \approx 0{,}84$. При турбулентном режиме течения [33]

$$r = \sqrt[3]{\text{Pr}};$$

так, например, для воздуха по опытным данным $r \approx 0{,}88$.

Следует отметить, что r не зависит от Re и М, а зависит только от значения критерия Pr и режима течения.

Реальный термоприемник, введенный в поток большой скорости, принципиально не может измерить его термодинамическую температуру T. Вследствие неполного торможения потока температура $T_{р.т}$ термоприемника будет отличаться и от температуры торможения T_0, при этом $T < T_{р.т} < T_0$. Температура $T_{р.т}$ термоприемника зависит от условий взаимодействия термоприемника и потока, на нее оказывает влияние передача тепла теплопроводностью между отдельными элементами термоприемника и если при этом учесть, что на эти процессы оказывает влияние теплообмен излучением с окружающей средой и окружающими предметами, тогда можно получить представление о том комплексном процессе, который определяет температуру $T_{р.т}$ термоприемника.

Для реального термоприемника по аналогии с уравнением (6-5-3) можно ввести понятие коэффициента восстановления r термоприемника

$$r=\frac{T_{р.т}-T}{T_0-T}=\frac{T_{р.т}-T}{\frac{v^2}{2c_p}}, \qquad (6\text{-}5\text{-}8)$$

или

$$r=1-\frac{T_0-T_{р.т}}{\frac{v^2}{2c_p}}. \qquad (6\text{-}5\text{-}9)$$

Из этих выражений имеем:

$$T=T_{р.т}-rv^2/2c_p; \qquad (6\text{-}5\text{-}10)$$

$$T_0=T_{р.т}+(1-r)\,v^2/2c_p. \qquad (6\text{-}5\text{-}11)$$

С учетом (6-5-5) уравнение (6-5-10) принимает вид:

$$\frac{T_{р.т}}{T}=1+r\frac{k-1}{2}M^2. \qquad (6\text{-}5\text{-}12)$$

Таким образом, при известном значении r можно, зная скорость газового потока v (или M и k) и температуру $T_{р.т}$, по уравнению (6-5-10) или (6-5-12) определить термодинамическую температуру T, а на основании выражения (6-5-11) подсчитать значение T_0. Следует указать, что чем выше и устойчивее коэффициент восстановления r, тем лучше качество термоприемника. Термоприемник является практически пригодным для измерения температуры газового потока большой скорости только в том случае, если его коэффициент восстановления в широких пределах изменения чисел Маха и Рейнольдса сохраняет постоянное значение.

Экспериментальные исследования по созданию различных конструкций термоприемников и определению их коэффициентов восстановления в зависимости от основных режимных параметров M, Re, Pr и k проводились различными авторами [34, 35, 36].

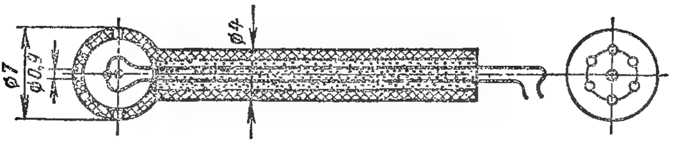


Рис. 6-5-1. Продольно обтекаемый термоприемник с шарообразной камерой торможения.

Большой практический интерес для целей постоянного контроля температуры и экспериментальных исследований представляют продольно и поперечно обтекаемые термоприемники с камерой торможения. Эта камера позволяет осуществлять торможение потока во внутренней проточной ее части, т. е. где расположен чувствительный элемент термоприемника. Коэффициент восстановления термоприемников этого типа, как показали экспериментальные исследования, проведенные Н. В. Илюхиным, В. П. Преображенским, Н. П. Бувиным, Г. М. Кудрявцевым, Б. М. Крассом, А. П. Успенским и др., сохраняет постоянное значение и не зависит в широких пределах от чисел M и Re.

На рис. 6-5-1 показан продольно обтекаемый термоприемник с шарообразной камерой торможения диаметром 7 мм. Вентиляционные отверстия выполнены диаметром 0,9 мм. Во внутренней проточной части камеры торможения расположен рабочий конец (спай) медь-константанового термоэлектрического термометра с диаметром термоэлектродов 0,3 мм. По данным Н. В. Илюхина [36], коэффициент восстановления r этого термоприемника сохраняет постоянное значение, равное 0,98. При определении коэффициента восстановления термоприемника охвачена область значений M от 0,3 до 0,75 и Re от 51 800 до 193 500.

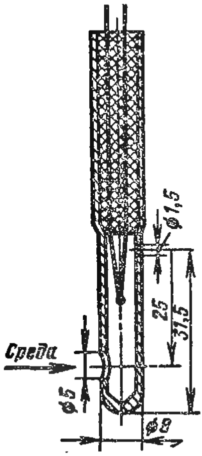


Рис. 6-5-2. Поперечно обтекаемый термоприемник с цилиндрической камерой торможения.

Ниже рассмотрим некоторые типы термоприемников с камерами торможения из числа исследованных под руководством автора на установке с внутренним диаметром экспериментального участка, равным 100 и 150 мм. Экспериментальные исследования проводились в потоке воздуха и газа (продуктов сгорания жидкого топлива) при температурах от 20 до 600°С.

На рис. 6-5-2 показан поперечно обтекаемый термоприемник с камерой торможения и двумя вентиляционными отверстиями. Рабочий конец хромель-алюмелевого термоэлектрического термометра расположен в проточной части камеры между передним и задним отверстиями. При дозвуковых скоростях течения коэффициент восстановления термоприемника $r = 0,94$ в широких пределах изменения чисел M и Re.

Рассмотрим продольно обтекаемый термоприемник с камерой торможения, показанный на рис. 6-5-3. Термоприемник имеет цилиндрическую камеру торможения, открытую со стороны набегающего потока. В стенке камеры торможения за рабочим концом хромель-алюмелевого термоэлектрического термометра имеются четыре боковых отверстия. Коэффициент восстановления термоприемника этого типа в широких пределах не зависит от M и Re и имеет устойчивое значение, т. е. $r = 0,975 \pm 0,005$. Изменение угла атаки в пределах $\pm 20°$ не оказывает влияния на коэффициент восстановления (рис. 6-5-4).

Экспериментальные исследования, проведенные различными авторами, показывают, что термоприемники с продольно обтекаемой камерой торможения имеют более высокий коэффициент восстановления, чем термоприемники с поперечно обтекаемой камерой торможения. Значения коэффициента восстановления $r = 0,97 \div 0,98$ у термоприемников с продольно обтекаемой камерой торможении сохраняются и при сверхзвуковых скоростях течения до чисел $M \approx 8$ в потоках газа низкой плотности.

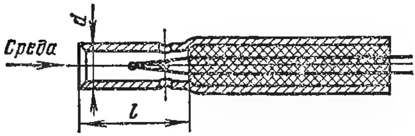


Рис. 6-5-3. Продольно обтекаемый термоприемник с цилиндрической камерой торможения ($d = 2,5 \div 5$ мм, $l = 16 \div 20$ мм).

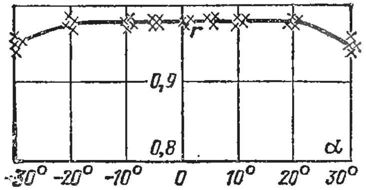


Рис. 6-5-4. Зависимость r от угла атаки α для термоприемника, показанного на рис. 6-5-3.

При измерении температуры дозвуковых и сверхзвуковых потоков необходимо соблюдать те же правила установки термоприемников, что и при измерении температуры в газовом потоке «умеренной»

скорости. Выводы, сделанные выше относительно уменьшения методических погрешностей, сохраняют свою силу и в случае измерения температуры в потоке большой скорости.

При применении для измерения температуры в потоке газа большой скорости термоприемников с камерой торможения методическая погрешность за счет теплообмена излучением будет играть меньшую роль, так как стенка камеры по существу является экраном, а следовательно, защитой от теплообмена излучением. Следует также отметить, что для потока большой скорости коэффициент теплоотдачи значительно больше, чем для потока «умеренной» скорости.

6-6. Измерение температуры поверхности и внутри тела

Измерение температуры поверхности тела. Для измерения температуры поверхности тел в промышленных условиях и при проведении научных исследований широко применяют различные конструкции поверхностных термоэлектрических термометров. В отдельных случаях для измерения температуры поверхности используют металлические или полупроводниковые термометры сопротивления специальных конструкций. На тепловых электростанциях для контроля за температурным режимом отдельных узлов агрегатов (например, металла барабана, выходных коллекторов пароперегревателей, отдельных змеевиков пароперегревателя и отдельных точек паропроводов парогенераторов) применяют только поверхностные термоэлектрические термометры.

При измерении температуры поверхности необходимо иметь в виду, что термоприемник может нарушать первоначальное распределение температур в контролируемом объекте. Вследствие этого при неблагоприятных условиях измерения может иметь место методическая погрешность и температура чувствительного элемента термоприемника будет отличаться от действительной температуры поверхности тела. Методическая погрешность измерения температуры поверхности тела зависит от ряда причин. Основными являются отвод или подвод тепла по термоприемнику вследствие теплопроводности, теплообмен термоприемника с окружающей средой и возможное изменение условий теплообмена поверхности тела со средой. Точность измерения поверхностной температуры зависит также от конструкции термоприемника, способа его монтажа на поверхности объекта, точности вторичного прибора и условий измерения.

При измерении температуры поверхности чувствительный элемент термоприемника должен иметь хороший тепловой контакт с поверхностью объекта. Термоприемник не должен вызывать в месте измерения изменений температуры как вследствие отвода от него или подвода к нему тепла, так и вследствие изменения теплообмена поверхности с окружающей средой. На рис. 6-6-1 показаны различные способы измерения температуры поверхности нагретого тела с помощью термоэлектрических термометров. Наиболее небла-

гоприятный вариант установки термоэлектрического термометра показан на рис. 6-6-1, *а*. В этом случае термоэлектроды термоприемника отводят тепло как от рабочего конца, так и от той части поверхности, температура которой должна быть измерена. Поэтому такой способ установки не может быть рекомендован. При проведении научных исследований рассмотренный способ установки термоэлектрического термометра применяют, но в этом случае термоэлектроды снабжают подогревателем для компенсации теплоотвода [27].

В целях уменьшения влияния теплоотвода иногда увеличивают поверхность соприкосновения рабочего конца термоэлектрического термометра, припаивая к нему тонкую металлическую пластину из материала с большим коэффициентом теплопроводности. Если в этом случае термоэлектрический термометр устанавливается перпендикулярно поверхности тела (рис. 6-6-1, *б*), то утечка тепла будет такой же, как и в первом случае. Однако количество тепла, отдавае-

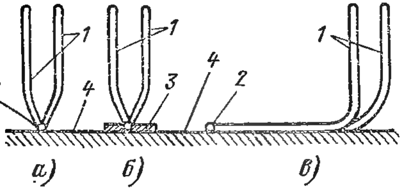


Рис. 6-6-1. Принципиальные схемы установки термоэлектрических термометров на поверхности.

1 — термоэлектроды термоэлектрического термометра, покрытые эмалью; *2* — рабочий конец; *3* — металлическая пластинка, соединенная с рабочим концом; *4* — поверхность, температура которой измеряется.

мое каждой отдельной точкой поверхности соприкосновения, уменьшится вследствие наличия пластины, увеличивающей площадь соприкосновения. Благодаря этому охлаждение в месте соприкосновения рабочего конца с поверхностью значительно уменьшится по сравнению с первым случаем, но все же методическая погрешность полностью не будет устранена.

Для уменьшения погрешности за счет теплоотвода до минимума термоэлектрический термометр рекомендуется устанавливать на поверхности тела по схеме рис. 6-6-1, *в*. Здесь термоэлектроды прокладываются на поверхности на длину не менее 150—200 их диаметров. В этом случае также имеет место теплоотвод по термоэлектродам термоприемника, но здесь тепло поступает в них по всей длине соприкосновения термоэлектродов с поверхностью, вследствие чего теплоотвод от рабочего конца термоэлектрического термометра значительно уменьшается.

Для подтверждения сделанных нами выводов ниже приводим экспериментальные данные, полученные при измерении температур на горизонтальной поверхности брусков из пробки, дерева и меди, обогревавшихся с нижней стороны. Температура измерялась с помощью термоэлектрических термометров, выполненных и установленных так, как показано на рис. 6-6-1. При проведении опытов температура окружающего воздуха равнялась 15°С. Результаты измерений приведены в табл. 6-6-1.

Таблица 6-6-1

Измеренные значения температуры поверхности, °С

Схема термоэлектрических термометров (рис. 6-6-1)	Материал бруска		
	Пробка	Дерево	Медь
а	23,0	25,6	31,9
б	32,4	34,3	34,5
в	35,4	35,4	35,4

Методическая погрешность отсутствует при установке термометра по схеме рис. 6-6-1, *в*. Как видно из табл. 6-6-1, погрешнсстъ растет с уменьшением коэффициента теплопроводности материала бруска.

Крепление рабочего конца и термоэлектродов термоэлектрического термометра должно производиться таким образом, чтобы пластинки, прижимающие рабочий конец и термоэлектроды к поверхности, не изменяли теплоотдачу в окружающую среду. Поэтому эти пластинки должны быть изготовлены из того же материала, что и поверхность стенки тела.

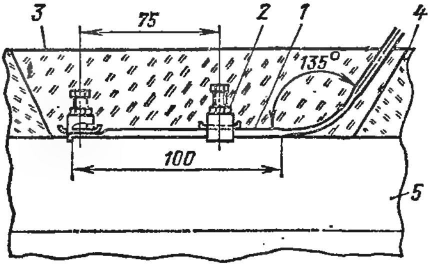


Рис. 6-6-2. Установка поверхностного термоэлектрического термометра ТХКП-XVIII на трубопроводе.

1 — термоэлектрический термометр ТХКП-XVIII; *2* — прижим; *3* — легкоснимаемый слой изоляции; *4* — тепловая изоляция; *5* — трубопровод.

В некоторых случаях термоэлектрический термометр помещают в канавке, закрытой пластинкой из того же материала, что и поверхность стенки, или заделанной специальной замазкой. В этом случае рабочий конец термоприемника, расположенный в канавке, для более надежного соприкосновения целесообразно припаять к стенке поверхности. Для электрической изоляции термоэлектродов, прокладываемых по поверхности или в канавке, применяют тонкие пластинки из слюды и другие изоляционные материалы.

Рассмотренные способы измерения температуры поверхности применяют преимущественно при проведении научных исследований. В промышленности для технических целей применяют поверхностные термоэлектрические термометры специальных конструкций.

В качестве примера на рис. 6-6-2 показана установка поверхностного термоприемника типа ТХКП-XVIII на трубопроводе (или металлической стенке). Этот термоэлектрический термометр может применяться для измерения температуры металлической поверхности до 400°С. Наличие тепловой изоляции при таком способе

установки обеспечивает достаточно хорошее совпадение температуры рабочего конца ее и поверхности. Прижимы, приваренные к стенке трубы, обеспечивают надежный тепловой контакт рабочего конца и прокладываемой плоской части термоприемника по поверхности.

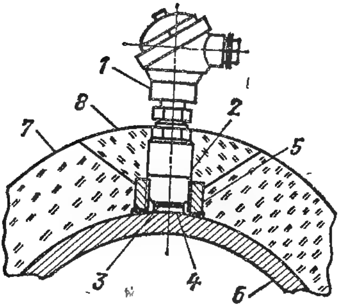


Рис. 6-6-3. Установка поверхностного термоэлектрического термометра ТХАП-551 на трубопроводе.

1 — термоэлектрический термометр ТХАП-551; *2* — муфта с наружной резьбой; *3* — контактная пластина рабочего конца термометра; *4* — дополнительная контактная пластина; *5* — бобышка с внутренней резьбой; *6* — трубопровод; *7* — тепловая изоляция; *8* — легкоснимаемый слой изоляции.

На рис. 6-6-3 показана установка поверхностного хромель-алюмелевого термоэлектрического термометра ТХАП-551 на трубопроводе, применяемого для измерения поверхностной температуры до 600°С. Термоэлектрический термометр ТХАП-551 выполнен из термоэлектродов диаметром 0,7 мм, изолированных между собой фарфоровыми бусами. Рабочий конец термометра помещен в никелевую контактную пластинку. Защитный чехол в нижней своей части снабжен муфтой с наружной резьбой, которая служит для крепления термоприемника в наваренной на трубопроводе бобышке с внутренней резьбой. Перед приваркой бобышки поверхность трубопровода зачищается. При креплении термоприемника в бобышке никелевая пластина его рабочего конца плотно прижимается к дополнительной никелевой прокладке, нижняя плоскость которой обработана по радиусу трубопровода. Такой способ крепления термоэлектрического термометра обеспечивает хороший тепловой контакт его рабочего конца с поверхностью трубы. Наличие тепловой изоляции значительно уменьшает методическую погрешность измерения за счет теплоотвода.

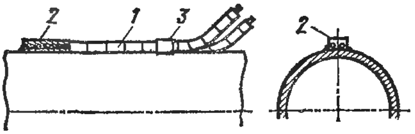


Рис. 6-6-4. Схема крепления поверхностного термоэлектрического термометра на трубопроводе.

1 — термоэлектрический термометр, термоэлектроды которого изолированы фарфоровыми бусами; *2* — рабочий конец, образованный зачеканкой концов термоэлектродов в отверстиях приваренной к трубе пластины; *3* — прижим.

Для измерения температуры поверхности труб или металлической стенки применяют также термоэлектрические термометры без защитных чехлов. Способ крепления термоэлектрического термометра на трубопроводе показан на рис. 6-6-4. Если трубопровод покрыт тепловой изоляцией, то термоэлектрический термометр должен быть закрыт легко снимаемым слоем изоляции.

Измерение температуры внутри тела. При измерении температуры внутри тела влияние теплообмена излучением отпадает. Несмотря на эти благоприятные условия при измерении температуры

внутри тела возможны заметные методические погрешности вследствие теплоотвода вдоль термоприемника, а также в тех случаях, когда тело обладает незначительным коэффициентом теплопроводности.

Если объем тела, внутри которого необходимо измерить температуру, большой, как, например, при измерении температуры в штабелях твердого топлива, почве и т. п., то достаточная глубина погружения термоприемника вполне обеспечивает равенство температуры чувствительного элемента и тела. Значительно большие затруднения возникают при измерении температуры внутри тел с небольшим объемом, в особенности если в них существуют большие температурные перепады и, следовательно, температуры в отдельных точках заметно различаются. Применяемые для этой цели термоприемники должны иметь малые размеры.

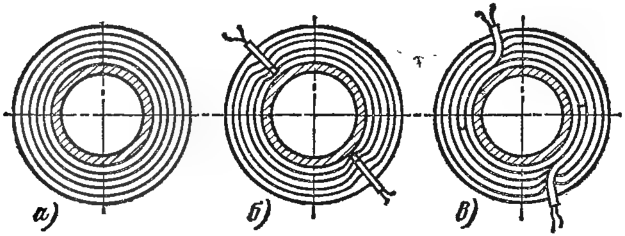


Рис. 6-6-5. Измерение температуры внутри изоляции, защищающей паропровод от тепловых потерь.

Для того чтобы методическая погрешность отсутствовала или была сведена к минимуму при измерении температуры в определенном месте внутри тела, термоприемник не должен нарушать температурного поля вследствие влияния теплоотвода вдоль него. Между термоприемником и телом должен быть обеспечен хороший тепловой контакт. Наиболее пригодным термоприемником для таких измерений является термоэлектрический термометр специальной конструкции. Если же требуется измерить среднюю температуру внутри тела, то с успехом может быть применен термометр сопротивления.

При измерении температуры внутри изоляции, защищающей, например, паропровод от тепловых потерь, необходимо учитывать сравнительно большое изменение температуры на единицу длины слоя изоляции. В этом случае температуру следует измерять в отдельных местах (точках) внутри слоя изоляции. Для уменьшения отвода тепла вдоль термоэлектрического термометра от места установки его рабочего конца следует термоэлектроды располагать так, чтобы часть их находилась в изотермической плоскости.

На рис. 6-6-5, *а* схематически представлено сечение паропровода, изолированного слоем тепловой изоляции. Концентрическими окруж-

ностями показаны изотермы. Если термоэлектрический термометр установлен радиально (рис. 6-6-5, *б*), т. е. по направлению температурного перепада, то в месте измерения температурное поле будет искажаться, что иллюстрируется изгибом изотерм. В данном случае будет иметь место методическая погрешность, обусловленная теплоотводом вдоль термоэлектрического термометра.

На рис. 6-6-5, *в* показана правильная установка термоэлектрического термометра. В этом случае искажения температурного поля в месте изгиба термоэлектродов, пересекающих изотермы, не влияют на точность измерений. Такой способ установки термоэлектрического термометра позволяет методическую погрешность за счет теплоотвода свести к минимуму.

Подробные сведения об оценке статических и динамических погрешностей измерения температур поверхности и внутри тела приводятся в книге Н. А. Ярышева [27].

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛ ПО ИХ ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

7-1. Общие сведения

Методы измерения температуры тел по их тепловому излучению называют часто методами пирометрии излучения. Средства измерений температуры тел по тепловому излучению принято называть пирометрами излучения или просто пирометрами. Они широко применяются в металлургической и в других отраслях промышленности, а также при проведении научных исследований для измерения температур тел от 300 до 6000°C и выше. Вообще же пирометры могут быть использованы для измерения и более низких температур.

При измерении температуры с помощью пирометров температурное поле объекта измерения не искажается, так как измерение, осуществляемое методами пирометрии излучения, не требует непосредственного соприкосновения с телом какого-либо термоприемника. Поэтому такие методы измерения температур тел принято называть бесконтактными.

Бесконтактные методы измерения температур теоретически не имеют верхнего температурного предела своего применения. Температура источника излучения со сплошным спектром, близкая к 6000°C, измеряется теми же методами, что и температура в 1000 или 2000°C. Различие может быть лишь только в технике измерений.

В тех случаях, когда для длительного измерения температур объектов могут применяться наряду с пирометрами излучения приборы, использующие контактные методы (термоприемники погружения), последним следует отдать предпочтение, так как они обычно обеспечивают более высокую точность измерения температуры по сравнению с пирометрами излучения.

7-2. Теоретические основы методов измерения температуры тел по их тепловому излучению

Методы измерения температур, использующие различные свойства теплового излучения тел, вытекающие из законов излучения абсолютно черного тела, нашли широкое практическое применение. Под абсолютно черным телом понимают тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию. Такие тела в природе отсутствуют, но модель черного тела можно осуществить с достаточной степенью приближения.

Моделью, наиболее приближающейся по своим свойствам к абсолютно черному телу, является полое непрозрачное тело с малым отверстием, все участки поверхности которого имеют одну и ту же температуру. Для такой модели черного тела коэффициент поглощения можно принять равным единице, так как энергия луча, попадающего в малое отверстие полого тела, практически полностью поглощается внутри последнего вследствие многократных отражений от внутренней поверхности. В дальнейшем все величины, относящиеся к абсолютно черному телу, мы будем отмечать индексом «0».

В пирометрии излучения в качестве величин, характеризующих тепловое излучение тел, применяют энергетическую светимость (излучательность) и энергетическую яркость (лучистость). При этом следует различать полную и спектральную светимость и яркость.

Под полной энергетической светимостью тела понимают полную (интегральную) поверхностную плотность излучаемой мощности, т. е.

$$R(T) = \int_0^\infty R(\lambda, T)\, d\lambda, \tag{7-2-1}$$

где $R(T)$ — полная энергетическая светимость при температуре T, Вт/м²; λ — длина волны излучения, м; $R(\lambda, T)$ — спектральная энергетическая светимость, отнесенная к очень узкой области спектра $d\lambda$ (от λ до $\lambda + d\lambda$), Вт/м³.

Очевидно, что в соответствии с (7-2-1)

$$R(\lambda, T) = dR(T)/d\lambda, \tag{7-2-2}$$

где $dR(T)$ — доля полной светимости в спектральном интервале $d\lambda$ при температуре T, Вт/м².

Энергетической яркостью тела в данном направлении называется мощность излучения в единичный телесный угол с единицы площади проекции поверхности тела на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Полная энергетическая яркость тела определяется, аналогично предыдущему, выражением

$$B(T) = \int_0^\infty B(\lambda, T)\, d\lambda, \tag{7-2-3}$$

где $B(T)$ — полная энергетическая яркость при температуре T, Вт/(ср·м²); $B(\lambda, T)$ — спектральная энергетическая яркость, отне-

сенная к очень узкой области спектра $d\lambda$, Вт/(ср·м³). Согласно формуле (7-2-3)

$$B(\lambda, T) = dB(T)/d\lambda, \quad (7\text{-}2\text{-}4)$$

где $dB(T)$ — доля полной яркости в спектральном интервале $d\lambda$ при температуре T, Вт/(ср·м²).

Источники излучения, яркость которых от направления не зависит, подчиняются закону Ламберта, и энергетическая светимость и яркость таких источников связаны между собой соотношением

$$R_0(T) = \pi B_0(T); \; R_0(\lambda, T) = \pi B_0(\lambda, T); \quad (7\text{-}2\text{-}5)$$

строго говоря, таким излучателем является только черное тело.

Энергетическая яркость (лучистость) является основной величиной, непосредственно воспринимаемой человеческим глазом, а также всеми пирометрами, основанными на измерении температуры по тепловому излучению.

Все реальные тела по степени поглощения ими лучистой энергии отличаются от черного тела и имеют коэффициент поглощения меньше единицы. Излучательная способность реальных тел также отличается от лучеиспускательной способности черного тела и может быть характеризована коэффициентом излучения полным или спектральным.

Полный коэффициент излучения ε_T является мерой, определяющей ту часть полной энергии, которую составляет излучение данного тела от полного излучения черного тела при той же температуре, т. е.

$$\varepsilon_T = B(T)/B_0(T), \quad (7\text{-}2\text{-}6)$$

где $B(T)$ и $B_0(T)$ — полная энергетическая яркость соответственно реального и черного тела при температуре T, Вт/(ср·м²).

Обозначая через ε_λ спектральный коэффициент излучения, характеризующий относительную лучеиспускательную способность тела при данных λ и T, аналогично предыдущему можем написать:

$$\varepsilon_\lambda = B(\lambda, T)/B_0(\lambda, T), \quad (7\text{-}2\text{-}7)$$

где $B(\lambda, T)$ и $B_0(\lambda, T)$ — спектральная энергетическая яркость соответственно реального и черного тела, Вт/(ср·м³).

Следует отметить, что на основании закона Кирхгофа спектральный коэффициент излучения любого тела равен его спектральному коэффициенту поглощения, $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$.

Для всех реальных тел $B(T) < B_0(T)$ и $B(\lambda, T) < B_0(\lambda, T)$, т. е. $0 < \varepsilon_T < 1$ и $0 < \varepsilon_\lambda < 1$. Коэффициенты излучения ε_T и ε_λ зависят от вещества тела, состояния его поверхности и температуры. Спектральный коэффициент ε_λ зависит также от λ, а ε_T — от спектрального состава излучения.

Так как излучательная способность зависит от индивидуальных особенностей реальных тел, то возникает необходимость градуировать пирометры по излучению черного тела. Применяя эти пирометры для измерения температуры реальных тел, излучающих сплошной

спектр, мы в большинстве случаев получаем значения температур, отличающиеся от действительных температур данных тел, поскольку их излучение не соответствует излучению черного тела. Эти температуры реальных тел, измеренные по их тепловому излучению, называют обычно условными.

Условные температуры находятся в определенном соотношении с действительными температурами реальных тел, причем эти соотношения между условными и действительными температурами устанавливаются теоретически с помощью законов излучения. При этом для определения значения действительной температуры с помощью полученных соотношений необходимо знать также коэффициент излучения реальных тел в тех лучах, которыми предложено оперировать при измерении их условной температуры.

Следует также иметь в виду, что условные температуры данного тела получаются при одной и той же его действительной температуре различными, в зависимости от того, какое свойство излучения положено в основу метода измерения условной температуры. Поэтому при установлении соотношения между условной и действительной температурой необходимо руководствоваться методом измерения условной температуры реальных тел. Условные температуры тел, измеренные пирометрами, тем больше отличаются от действительных, чем значительнее характер излучения этих тел отличается от характера излучения черного тела. Это является принципиальным недостатком методов измерения температуры тел по тепловому излучению. Применяемые неавтоматические способы введения соответствующих методических поправок в показания пирометров, позволяющие перейти от измеренных условных температур к действительным температурам тел, мало надежны. Рассматриваемый ниже метод автоматического введения поправок, позволивший создать пирометр для измерения действительной температуры тел (см. § 7-5), является перспективным.

Ниже ознакомимся с различными свойствами теплового излучения черного тела, вытекающими из законов излучения, положенными в основу наиболее распространенных бесконтактных методов измерения температур реальных тел.

Зависимость спектральной энергетической светимости черного тела от длины волны и температуры описывается уравнением Планка

$$R_0(\lambda,\ T) = c_1\lambda^{-5}\left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right), \qquad (7\text{-}2\text{-}8)$$

где c_1 и c_2 — постоянные коэффициенты ($c_1 = 3{,}7413\cdot10^{-16}$ Вт·м², $c_2 = 1{,}4388\cdot10^{-2}$ м·К); λ — длина волны, м; T — температура, К; e — основание натуральных логарифмов.

Учитывая соотношение (7-2-5), получаем формулу Планка для спектральной энергетической яркости черного тела:

$$B_0(\lambda,\ T) = c_1'\lambda^{-5}\left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right), \qquad (7\text{-}2\text{-}9)$$

где $c_1' = c_1/\pi = 1{,}191\cdot10^{-16}$ Вт·м²/ср.

В ограниченном интервале температур и при малых значениях длин волн зависимость спектральной энергетической яркости черного тела от длины волны и температуры может быть выражена уравнением Вина

$$B_0(\lambda, T) = c_1' \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}. \qquad (7\text{-}2\text{-}10)$$

Уравнение (7-2-10) более удобно для практического применения в пирометрии, чем формула Планка. При применении формулы Вина необходимо иметь в виду, что она приводит к заниженным по сравнению с формулой Планка значениям $B_0(\lambda, T)$, например, при $\lambda T = 2000$ мкм·К на 0,08% и при $\lambda T = 3000$ мкм·К на 0,8%, а температура получается завышенной, следовательно, поправка имеет отрицательный знак. Для $\lambda = 0{,}66$ мкм при 3000 и 4000 К поправка составляет соответственно —0,5 и —4 К. При более высоких значениях λT формула Вина дает погрешность тем больше, чем больше произведение λT. Если уравнение Вина используется для видимой области спектра, то оно с достаточной точностью справедливо для всего интервала температур, в котором обычно производятся промышленные измерения температуры, т. е. до 3000 К. При более высокой температуре поправки могут быть определены расчетным путем и учтены при измерении.

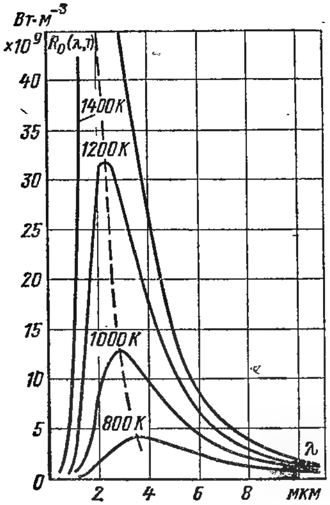


Рис. 7-2-1. Зависимость энергетической яркости (светимости) черного тела от длины волны и абсолютной температуры.

На рис. 7-2-1 дано семейство кривых спектральной светимости $R_0(\lambda, T) = \pi B_0(\lambda, T)$ черного тела в зависимости от длины волны, построенных по формуле Планка, при различных температурах. Эти кривые дают наглядное представление о свойствах теплового излучения черного тела, положенных в основу бесконтактных методов измерения температуры тел. Кривые рис. 7-2-1 показывают, что спектральная яркость с увеличением температуры черного тела быстро возрастает. В видимой области спектра, например, при $\lambda = 0{,}65$ мкм, $T = 1000$ К и 2000 К спектральная яркость черного тела возрастает соответственно в 20 и 16 раз быстрее, чем температура. Это обстоятельство позволяет осуществлять измерение температуры в видимой области спектра по изменению с температурой яркости тела в данной длине волны. Условную температуру реального тела, измеренную этим методом, принято называть яркостной температурой. Приборы, предназначенные для измерения яркостной

температуры в видимой области спектра, обычно называют оптическими и фотоэлектрическими пирометрами.

Из кривых, представленных на рис. 7-2-1, видно, что по мере уменьшения температуры черного тела максимум распределения энергии его излучения смещается в сторону длинноволновой области спектра. Это и явилось основанием использовать для измерения яркостной температуры тел инфракрасную область спектра, выделяя из нее сравнительно неширокий рабочий спектральный участок. Используя инфракрасную область спектра, представляется возможность обеспечить измерение яркостных температур тел более низких, чем в видимой области спектра.

При выборе спектрального участка необходимо учитывать, что по мере возрастания длин волн и понижения температуры коэффициент излучения для большинства металлов снижается. Кроме того, при выборе рабочего интервала в инфракрасной области спектра необходимо также учитывать, что некоторые участки спектра претерпевают в воздушном слое между прибором и излучателем заметное поглощение. Основными компонентами в воздухе, создающими заметное поглощение лучистой энергии в некоторых участках инфракрасной области спектра, являются водяные пары и углекислый газ.

Как видно из рис. 7-2-1, с повышением температуры максимум кривой распределения энергии излучения по спектру смещается в сторону коротких волн. Длина волны $\lambda_{\text{макс}}$, соответствующая максимуму кривой распределения энергии в спектре излучения черного тела, связана с абсолютной температурой T соотношением

$$\lambda_{\text{макс}} T = b, \tag{7-2-11}$$

где b — постоянная, равная 2896 мкм·К.

Соотношение (7-2-11) носит название закона смещения Вина. Пунктирная линия (рис. 7-2-1), проходящая через максимумы всех кривых, соответствует закону смещения Вина.

В видимой части спектра смещение $\lambda_{\text{макс}}$ и, следовательно, перераспределение энергии, вызываемое изменением температуры тела, приводит к изменению его цвета. Это и послужило основанием существующие методы измерения температур тел, основанные на изменении с температурой распределения энергии внутри данного участка спектра излучения, называть цветовыми методами. Условная температура тела, измеренная этими методами, называется цветовой температурой.

Наибольшее распространение из существующих получил метод измерения цветовой температуры в видимой области спектра по отношению энергетических яркостей в двух спектральных интервалах. Этот метод измерения цветовой температуры реальных тел может быть перенесен и на инфракрасную область спектра. В этом случае термин «цветовая температура» будет иметь чисто условный смысл, указывающий на метод измерения этой величины. Приборы, предназначенные для измерения цветовой температуры по отноше-

нию спектральных энергетических яркостей, принято называть пирометрами спектрального отношения или цветовыми пирометрами.

Цветовая температура может быть измерена путем сравнения цвета реального тела с цветом черного тела, или сравнением в данной области спектра распределения энергии излучения рассматриваемого реального и черного тела. Последние два метода измерения цветовой температуры не получили широкого применения и поэтому ниже рассматриваться не будут.

Возвращаясь к кривым рис. 7-2-1, легко заметить, что полная мощность излучения черного тела по всему спектру от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ при температуре T может быть определена по формуле Планка (7-2-8)

$$R_0(T) = \int_0^\infty R_0(\lambda, T)\, d\lambda = \int_0^\infty c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right) d\lambda.$$

Интегрируя, приходим к выражению

$$R_0(T) = \sigma_0 T^4, \tag{7-2-12}$$

где σ_0 — постоянная, равная $5{,}6696 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4).

Выражение (7-2-12) широко применяется и называется законом Стефана—Больцмана для полной энергетической светимости. Пользуясь формулой Планка (7-2-9), аналогично предыдущему получим выражение закона Стефана—Больцмана для интегральной энергетической яркости

$$B_0(T) = \sigma_0' T^4. \tag{7-2-13}$$

Постоянная σ_0' связана с постоянной σ_0 соотношением $\sigma_0' = \sigma_0/\pi = 1{,}8047$ Вт/(ср $\cdot$ м$^2 \cdot$ К^4).

Закон Стефана—Больцмана положен в основу метода измерения температур тел по их полному тепловому излучению. Условную температуру реального тела, измеренную этим методом, принято называть радиационной температурой или температурой полного излучения. Пирометры, предназначенные для измерения радиационной температуры, обычно называют пирометрами полного излучения или радиационными.

Как уже отмечалось, зависимость от температуры спектральной энергетической яркости излучения черного тела определяется формулой Планка или Вина в виде (7-2-9) и (7-2-10), справедливом для монохроматического излучения. При использовании этих формул для установления соотношения между условными (яркостной и цветовой) температурами необходимо иметь в виду, что строго монохроматических излучений в природе не существует. Любое измеряемое излучение с помощью точных спектральных приборов, как бы мал ни был спектральный интервал, имеющий конечную ширину, является квазимонохроматическим. Это излучение в ряде случаев можно рассматривать как эквивалентное монохроматическое с определенным значением длины волны $\lambda_э$, находящимся внутри выбранного конечного спектрального интервала и остающимся

постоянным в диапазоне температур от T_1 до T_2 с заданной погрешностью. Длина волны $\lambda_э$ эквивалентного монохроматического излучения называется в пирометрии эффективной длиной волны. Методика расчета или определения эффективных длин волн монохроматизирующих устройств подробно излагается в монографиях, посвященных пирометрии.

Далее уточним понятия условных (яркостной, цветовой, радиационной) температур и выведем уравнения, позволяющие осуществить переход от условных температур реальных тел к их действительной температуре.

Яркостная температура. Яркостной температурой реального тела θ в свете длины волны $\lambda_э$ называется такая температура черного тела, при которой спектральные энергетические яркости реального тела, имеющего температуру T, и черного тела в лучах той же длины волны равны между собой. Согласно этому определению яркостной температуры с учетом выражения (7-2-7) имеем:

$$B(\lambda_э, T) = \varepsilon_\lambda B_0(\lambda_э, T) = B_0(\lambda_э, \theta).$$

Подставив в это уравнение значения спектральных яркостей по формуле (7-2-10), получим:

$$\varepsilon_\lambda c_1' \lambda_э^{-5} e^{-c_2/\lambda_э T} = c_1' \lambda_э^{-5} e^{-c_2/\lambda_э \theta}.$$

После сокращения подобных членов и логарифмирования последнее выражение принимает вид:

$$\frac{1}{\theta} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_э}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}. \qquad (7\text{-}2\text{-}14)$$

Это уравнение при условии $T \leqslant 3000$ К позволяет вычислить действительную температуру физического тела T, зная его спектральный коэффициент излучения ε_λ и яркостную температуру θ, измеренную пирометром. Яркостная температура θ тем больше отличается от действительной T, чем меньше спектральный коэффициент излучения ε_λ. Так как $0 < \varepsilon_\lambda < 1$, то правая часть уравнения (7-2-14) всегда положительна и яркостная температура физических тел всегда меньше их действительной температуры.

Если измерение температур тел производится в области значений λT, в которой формула (7-2-14) не обеспечивает необходимую точность определения T, то для получения соотношения между действительной температурой реального тела и его яркостной температурой используют формулу, следующую из уравнения Планка

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_э}{c_2} \ln \left[\varepsilon_\lambda \left(e^{\frac{c_2}{\lambda_э \theta}} - 1 \right) + 1 \right]. \qquad (7\text{-}2\text{-}15)$$

Цветовая температура. Цветовой температурой реального тела $T_ц$ называется такая температура черного тела, при которой отношение энергетических яркостей его при двух эффективных длинах волн λ_1 и λ_2 равно отношению энергетических яркостей реального тела, обладающего температурой T, при тех же длинах волн. Соглас-

по этому определению цветовой температуры с учетом выражения (7-2-7) имеем:

$$\frac{B(\lambda_1, T)}{B(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1} B_0(\lambda_1, T)}{\varepsilon_{\lambda_2} B_0(\lambda_2, T)} = \frac{B_0(\lambda_1, T_ц)}{B_0(\lambda_2 T_ц)}. \quad (7\text{-}2\text{-}16)$$

Учитывая уравнение (7-2-10), на основании (7-2-16) получим:

$$\frac{c_1' \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda_1 T_ц}}{c_1' \lambda_2^{-5} e^{-c_2/\lambda_2 T_ц}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1} c_1' \lambda_2^{-5} e^{-c_2/\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda_2} c_1' \lambda_2^{-5} e^{-c_2/\lambda_2 T}}.$$

После сокращения подобных членов и логарифмирования последнее соотношение принимает вид:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_ц} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}}{c_2\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}. \quad (7\text{-}2\text{-}17)$$

Эта формула позволяет вычислить действительную температуру реального тела T, зная значение отношения его спектральных коэффициентов излучения ε_{λ_1} и ε_{λ_2} и цветовую температуру $T_ц$, измеренную пирометром.

Для серых тел, у которых значение спектрального коэффициента излучения в данном участке спектра не меняется с длиной волны ($\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$), правая часть формулы (7-2-17) обращается в нуль и поэтому цветовая температура $T_ц$ таких тел равна их действительной температуре.

Следует отметить, что при температурах выше 1000°С излучение большого количества окислов и карбидов металлов практически серое. В частности, серый характер обычно имеет излучение окисных пленок (ванадия, хрома, кремния и т. п.) на поверхности стальной ванны. Это подтверждает преимущество цветового метода, так как яркостная и радиационная температура всегда, в отличие от цветовой, ниже действительной.

Для тел, у которых спектральный коэффициент черноты излучения убывает с ростом длины волны ($\varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_1}$) (большинство металлов), цветовая температура больше действительной температуры. Для тел, у которых спектральный коэффициент черноты излучения возрастает по мере роста длины волны ($\varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_1}$) (многие неметаллические тела), цветовая температура меньше действительной.

Следует отметить, что уравнение (7-2-17) может быть использовано для перехода от измеренной цветовой температуры реального тела к его действительной температуре только в пределах применимости формулы Вина. Для получения уравнения, свободного от ограничений при переходе от цветовой температуры тела к его действительной температуре, необходимо в выражение (7-2-16) подставлять значения спектральных яркостей по формуле Планка.

Цветовую температуру тела $T_ц$ можно выразить через яркостные температуры θ_1 и θ_2 того же тела, измеренные в лучах эффективных длин волн λ_1 и λ_2. Для нахождения связи яркостных температур тела θ_1 и θ_2 в лучах длин волн λ_1 и λ_2 с цветовой температурой того же тела $T_ц$, измеренной при тех же длинах волн, представим выражение (7-2-16) в следующем виде:

$$\frac{B(\lambda_1, T)}{B(\lambda_2, T)} = \frac{B_0(\lambda_1, \theta_1)}{B_0(\lambda_2, \theta_2)} = \frac{B_0(\lambda_1, T_ц)}{B_0(\lambda_2, T_ц)}.$$

Подставив в правую часть этого уравнения значения спектральных яркостей по формуле Вина, после сокращения и логарифмирования получим:

$$T_ц = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)\,\theta_1\theta_2}{\lambda_1\theta_1 - \lambda_2\theta_2}. \qquad (7\text{-}2\text{-}18)$$

Формулу (7-2-18) используют в метрологической практике при градуировке на цветовые температуры образцовых излучателей, применяемых для градуировки цветовых пирометров.

Радиационная температура. Радиационной температурой реального тела $T_р$ называется такая температура черного тела, при которой его полная мощность излучения равна полной энергии, излучаемой реальным телом при температуре T. Согласно этому определению радиационной температуры с учетом выражения (7-2-6) имеем:

$$B(T) = \varepsilon_T B_0(T) = B_0(T_р).$$

Учитывая формулу Стефана—Больцмана (7-2-12), получим:

$$\varepsilon_T \sigma_0' T^4 = \sigma_0' T_р^4,$$

откуда

$$T = T_р \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}}. \qquad (7\text{-}2\text{-}19)$$

Эта формула позволяет осуществлять переход к действительной температуре тела T, зная коэффициент излучения и радиационную температуру $T_р$, измеренную пирометром. При определении ε_T по таблицам, приводимым в литературе, необходимо иметь в виду, что применяемые пирометры полного излучения (радиационные пирометры) не используют весь спектр от нуля до бесконечности. Поэтому выбранное значение ε_T должно соответствовать спектральной характеристике применяемого пирометра полного излучения. Так как для всех реальных тел $0 < \varepsilon_T < 1$, то, как видно из формулы (7-2-19), радиационная температура тела всегда будет меньше его действительной температуры.

7-3. Оптические пирометры

Оптические пирометры или так называемые пирометры визуальные с «исчезающей» нитью переменного накала широко применяются для измерения яркостной температуры в видимой области спектра.

Интервал измеряемых температур для общепромышленных пирометров с исчезающей нитью установлен от 700 до 8000°С в видимой области спектра (ГОСТ 8335-74).

Измерение яркостных температур пирометрами с исчезающей нитью основано на сравнении в свете эффективной длины волны в видимой области спектра яркости исследуемого тела с яркостью нити пирометрической лампы. При этом в качестве чувствительного элемента (лучеприемника) для фиксирования наличия или отсутствия равновесия яркостей двух одновременно рассматриваемых изображений тел служит человеческий глаз. Вследствие этого измерения температуры пирометром с исчезающей нитью отличаются известной субъективностью, что следует иметь в виду при их применении.

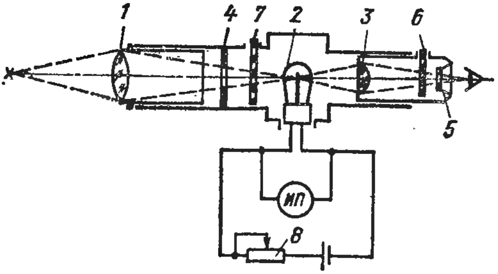


Рис. 7-3-1. Схема устройства оптического пирометра с исчезающей нитью накала.

1 — объектив; *2* — пирометрическая лампа; *3* — окуляр; *4* — диафрагма входная; *5* — диафрагма выходная; *6* — красный светофильтр; *7* — поглощающее стекло; *8* — реостат.

Пирометр (рис. 7-3-1) состоит из первичного преобразователя (телескопа), измерительного прибора и источника питания. Изображение объекта, температуру которого необходимо измерить, с помощью объектива создается в фокальной плоскости телескопа. В этой же плоскости расположена вольфрамовая нить пирометрической лампы. Окуляр телескопа, предназначенный для наблюдения нити лампы на фоне изображения источника излучения (объекта), может перемещаться вдоль оптической оси, что дает возможность устанавливать необходимую видимость нити лампы на фоне изображения объекта. Для постоянства и ограничения углов входа и выхода в оптической системе телескопа установлены две диафрагмы. При строго определенных значениях входного и выходного углов, размера отверстия входной диафрагмы, диаметра объектива в свету, фокусного расстояния окулярной линзы и диаметра выходного зрачка (выходной диафрагмы) телескопа, а также некоторых других размеров достигается независимость показаний оптического пирометра от изменения положения объектива относительно фокальной плоскости, а следовательно, и от изменения расстояния от источника излучения до объектива.

Между окуляром и выходной диафрагмой находится стеклянный красный светофильтр для монохроматизации пучка лучей, попадающих в глаз наблюдателя. Этот светофильтр можно вывести из поля зрения для облегчения наводки и фокусировки телескопа при небольшой яркости источника излучения, но в момент уравнивания яркости и измерения он должен быть обязательно введен в поле зрения.

Накал нити пирометрической лампы, а следовательно, и ее яркость зависят от протекающей по нити силы тока, которая регулируется с помощью реостата.

В общепромышленных оптических пирометрах в качестве измерительного прибора используется показывающий милливольтметр со шкалой, позволяющей производить отсчет яркостной температуры, выраженной в градусах Цельсия. В некоторых типах оптических пирометров в качестве показывающего прибора применяется миллиамперметр, включаемый последовательно с нитью лампы. Следует отметить, что при начале свечения нити лампы ток составляет примерно 50% тока при накале нити, соответствующем температуре верхнего предела измерения, в то время как напряжение на зажимах лампы достигает примерно 25% напряжения, соответствующего той же температуре. Поэтому измерять напряжение на зажимах лампы выгоднее, чем ток, так как в этом случае лучше используется шкала электроизмерительного прибора. В оптических пирометрах повышенной точности и образцовых в качестве измерительных приборов используются потенциометры, обеспечивающие большую точность измерения.

При фокусировке телескопа объектив перемещают вдоль оптической оси, добиваясь резкой видимости объекта и совпадения плоскости его изображения с плоскостью нити лампы. Когда телескоп фокусирован на объект, яркостная температура которого измеряется, в поле зрения на фоне изображения источника видна верхняя часть дуги нити лампы. Если при этом яркость нити будет меньше, чем яркость фона изображения источника, то нить представится черной; если фон имеет меньшую по сравнению с нитью яркость, то нить будет выглядеть как светлая дуга на более темном фоне. Меняя сопротивление реостата, можно установить такую силу тока, при которой в пределах контрастной чувствительности человеческого глаза равенство яркостей нити и фона создает эффект исчезновения нити, которая перестает быть видимой. Соответствующее этому равенству яркостей напряжение на зажимах лампы отсчитывается по включенному в цепь измерительному прибору. Для удобства применения рабочих пирометров показывающие приборы снабжаются обычно шкалой, позволяющей отсчитывать непосредственно яркостную температуру, выраженную в градусах Цельсия.

В оптических пирометрах для монохроматизации света применяют светофильтр из красного стекла марки КС-15. На рис. 7-3-2 представлены кривые пропускания красного светофильтра для разных длин волн и относительной спектральной чувствительности человеческого глаза или так называемой относительной видности глаза. Горизонтальная штриховка обозначает спектральную область чувствительности человеческого глаза, а наклонная штриховка — область поглощения лучистой энергии в красном светофильтре. Таким образом, человеческий глаз через красный светофильтр воспринимает только область спектра, отмеченную горизонтальной и вертикальной штриховкой. Это позволяет световой поток рассмат-

ривать как эквивалентное монохроматическое излучение со значением эффективной длины волны $\lambda_э$, определяемым с погрешностью, обычно не превышающей 0,01—0,02 мкм. У применяемых оптических пирометров с красным светофильтром из стекла КС-15 эффективная длина волны лежит в пределах 0,65—0,66 мкм.

Выше отмечалось, что при повышении температуры тела в соответствии с законом смещения Вина максимум энергии излучения смещается в сторону коротких волн; это в свою очередь обусловливает уменьшение эффективной длины волны пирометра. Для пирометра, использующего для монохроматизации красный светофильтр, смещение эффективной длины волны при измерении температуры тела от 800 до 3000°С не превышает 0,002—0,003 мкм. Это смещение не велико и для рабочих пирометров не учитывается.

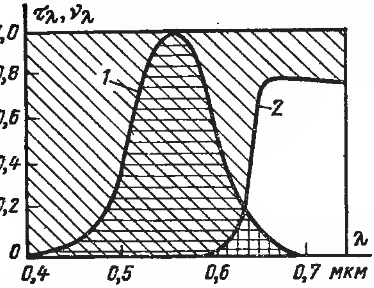


Рис. 7-3-2. Кривые спектральной чувствительности человеческого глаза (*1*) и пропускания красного светофильтра (*2*).

ν_λ — относительная спектральная чувствительность человеческого глаза; τ_λ — спектральный коэффициент пропускания красного светофильтра.

Надежность работы оптических пирометров определяется главным образом стабильностью характеристик пирометрической лампы и постоянством показаний измерительного прибора. Опыт показал, что у пирометрической лампы с вольфрамовой нитью в течение очень долгого времени сохраняется постоянство характеристик, т. е. зависимость яркости нити от силы тока, протекающего через нее, если нить лампы не подвергается нагреву выше 1400°С. Поэтому для измерения яркостной температуры выше 1400°С телескоп оптического пирометра снабжают поглощающим стеклом, помещаемым между объективом и пирометрической лампой. Поглощающее стекло может быть установлено и перед объективом в целях уменьшения его нагрева. Поглощающее стекло, предназначенное для ослабления яркости источника излучения, обычно характеризуют его коэффициентом пропускания. Значение этого коэффициента показывает, какая доля лучистой энергии спектрального участка, используемого в оптическом пирометре, упавшая на стекло, пропускается им. Таким образом, измерение яркостных температур с включенным поглощающим стеклом производится путем сравнения неослабленной яркости нити пирометрической лампы с ослабленной яркостью источника излучения.

В качестве поглощающего стекла обычно применяют пурпурное стекло марки ПС-2, а иногда марки НС-13. Проведенные во ВНИИМ исследования показали, что оптическая плотность этих стекол зависит от температуры самих стекол. При повышении температуры поглощающего стекла ПС-2 его оптическая плотность увеличивается,

а стекла НС-13 уменьшается. Следует также иметь в виду, что влияние температуры у стекла НС-13 оказывается несколько сильнее, чем у стекла ПС-2.

В приборах, имеющих верхний предел измерений 2000°С, устанавливают поглощающее стекло такой оптической плотности, чтобы при яркостной температуре объекта 2000°С яркостная температура изображения не превышала 1400° С. Некоторые типы оптических пирометров снабжаются двумя поглощающими стеклами: одно, например, для измерения температур от 1200 до 2000°С, второе — от 1800 до 3000°С. Оптическая плотность поглощающих стекол в данном случае выбирается так же, как и в предыдущем случае, т. е. при яркостной температуре объекта 2000 или 3000° С яркостная температура изображения не должна превышать 1400°С.

Показывающие приборы оптических пирометров, рассчитанные на два диапазона измерений, снабжаются двумя шкалами, например, первая предназначается для измерения яркостных температур в интервале 800—1400°С при выведенном поглощающем стекле, а вторая 1200—2000°С — для измерений с поглощающим стеклом.

Найдем соотношение между температурой T_0 черного тела, которое рассматривается при измерении в свете длины волны $\lambda_э$ непосредственно глазом наблюдателя, и температурой $T'_0 > T_0$ второго черного тела, которое в свете той же волны рассматривается при измерении через поглощающее стекло с коэффициентом пропускания τ'_λ. Меняя температуру T'_0 второго тела до значения T_{01} ($T_{01} > T_0$), можно добиться того, что изображения обоих тел будут иметь одинаковую видимую яркость. Тогда, зная температуру T_0, длину волны $\lambda_э$ и коэффициент пропускания τ'_λ поглощающего стекла, можно расчетным путем определить T_{01}. Используя уравнение (7-2-10) и учитывая, что согласно принятому условию $B_0(\lambda_э, T_0) = \tau'_\lambda B_0(\lambda_э T_{01})$, получаем:

$$c'_1\lambda_э^{-5}e^{-c_2/\lambda_э T_0} = \tau'_\lambda c'_1\lambda_э^{-5}e^{-c_2/\lambda_э T_{01}}$$

и после необходимых сокращений и логарифмирования будем иметь:

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{01}} = \frac{\lambda_э}{c_2}\ln\frac{1}{\tau'_\lambda} \quad (7\text{-}3\text{-}1)$$

или

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{01}} = A, \quad (7\text{-}3\text{-}2)$$

где

$$A = \frac{\lambda_э}{c_2}\ln\frac{1}{\tau'_\lambda}. \quad (7\text{-}3\text{-}3)$$

Величина A, характеризующая ослабляющее действие данного поглощающего стекла, получила название пирометрического ослабления.

Пирометрическое ослабление A может быть определено экспериментально с использованием формулы (7-3-2) сличением с градуиро-

ванным источником излучения. Уравнение (7-3-2) имеет большое значение в оптической пирометрии. Это уравнение позволяет производить градуировку и поверку шкалы оптических пирометров выше 1400°С; кроме того, на его основе с помощью набора ослабляющих устройств воспроизводится температурная шкала по одной опорной точке T_0 — точке затвердевания золота [26].

Оптический пирометр типа ОППИР-017, снабженный встроенным в первичный преобразователь (телескоп) показывающим измерительным прибором, является техническим пирометром с исчезающей

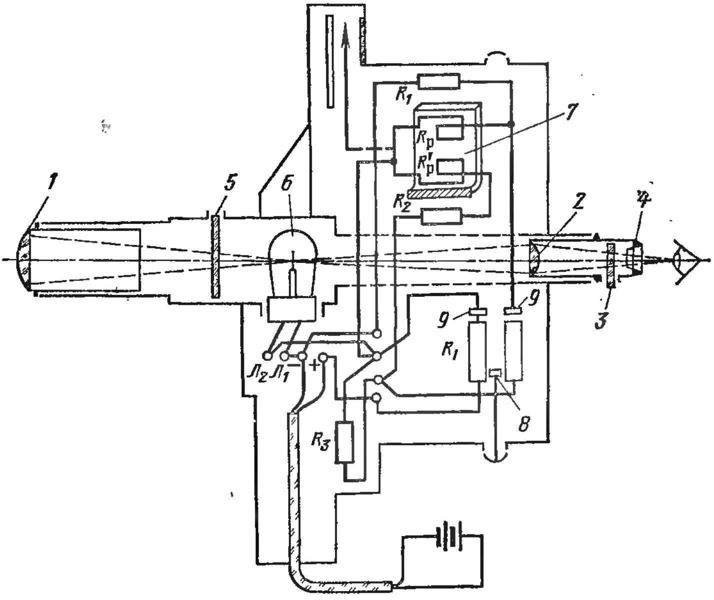


Рис. 7-3-3. Схема устройства оптического пирометра типа ОППИР-017.

нитью переменного накала. Пирометр рассчитан на следующие диапазоны измерений яркостной температуры: 800—2000° С, 1200—3000°С. Схема прибора показана на рис. 7-3-3. Оптическая система пирометра состоит из объектива *1*, окуляра *2*, красного светофильтра *3*, диафрагмы *4* для ограничения и обеспечения постоянства выходного угла и поглощающего стекла *5*. В фокальной плоскости телескопа находится нить пирометрической лампы *6*.

В качестве показывающего прибора используется дифференциальный амперметр *7* магнитоэлектрической системы с двумя рамками R_p и R_p'. Рамка R_p является основной и включена параллельно нити пирометрической лампы. Рамка R_p', представляющая собой дополнительную рамку, включенную последовательно с нитью лампы, создает вращающий момент, противоположный моменту основной рамки. Такая схема прибора позволяет уменьшить нерабочий участок его шкалы до минимального значения.

Сила тока, протекающего через нить, регулируется с помощью кольцевого реостата R_I. При повороте кольца, а следовательно, и движка *8* слева направо сопротивление реостата уменьшается. При крайнем левом положении кольца движок сходит со спиралей реостата и разрывает цепь питания током нити лампы. При этом движок соединяет концевые контакты *9* и замыкает накоротко основную рамку $R_р$, что способствует успокоению подвижной части прибора и уменьшению колебаний ее при переноске пирометра.

Принципиальная электрическая схема оптического пирометра ОППИР представлена на рис. 7-3-4, где $R_р$ и $R'_р$ — основная и дополнительная рамки измерительного прибора; R_1 и R_2 — добавочные резисторы основной и дополнительной рамок; R_3 — резистор, шунтирующий дополнительную рамку; *Л* — пирометрическая лампа; *К* — концевые контакты; R_I — реостат для регулирования силы тока, протекающего через нить лампы; *ИП* — источник питания (напряжение от 2,6 до 2,0 В).

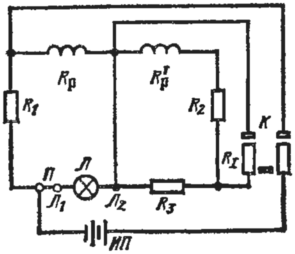


Рис. 7-3-4. Принципиальная электрическая схема оптического пирометра ОППИР-017.

Зажимы $Л_1$ и $Л_2$ пирометрической лампы служат для подключения к ней другого прибора при отсоединенной измерительной схеме встроенного прибора (перемычка *П* снята). В этом случае измерение силы тока, протекающего через нить пирометрической лампы, можно производить потенциометром путем измерения падения напряжения на образцовом резисторе, включаемом последовательно с нитью лампы и источником питания.

Лабораторный оптический пирометр типа ОП с исчезающей нитью переменного накала предназначается для измерения яркостных температур от 900 до 3000°С. Этот прибор применяют как образцовый 2-го разряда, так и для измерения температур при различных научных исследованиях.

Устройство оптического пирометра ОП показано на рис. 7-3-5. Объектив *1* и окуляр *3* пирометра помещены в тубусы, закрепленные в кронштейне *4* и соединенные с коробкой *5*, в патроне которой установлена пирометрическая лампа *6*. Перемещение объектива производится поворотом наружного кольца *2*. Между пирометрической лампой и окуляром установлен красный светофильтр *7* для монохроматизации света.

Патрон пирометрической лампы снабжен юстировочным приспособлением, позволяющим устанавливать нить лампы на оптической оси прибора.

При наводке оптической системы пирометра на исследуемый объект тубусы и коробки пирометрической лампы, закрепленные на кронштейне, могут поворачиваться на вертикальной винтовой стойке *8* в пределах 30°, а при вращении маховика *9* — подниматься

или опускаться на 100 мм. Основание пирометра *12* имеет упор и два установочных винта, позволяющих изменять наклон пирометра в нужных пределах. По окончании наводки положение оптической системы фиксируется с помощью стопорных винтов.

Внутри вертикальной винтовой стойки *8* проложены соединительные провода от патрона пирометрической лампы к реостатам грубой *10* и точной *11* регулировки. Для подключения источника питания и измерительной схемы предусмотрены зажимы *13*.

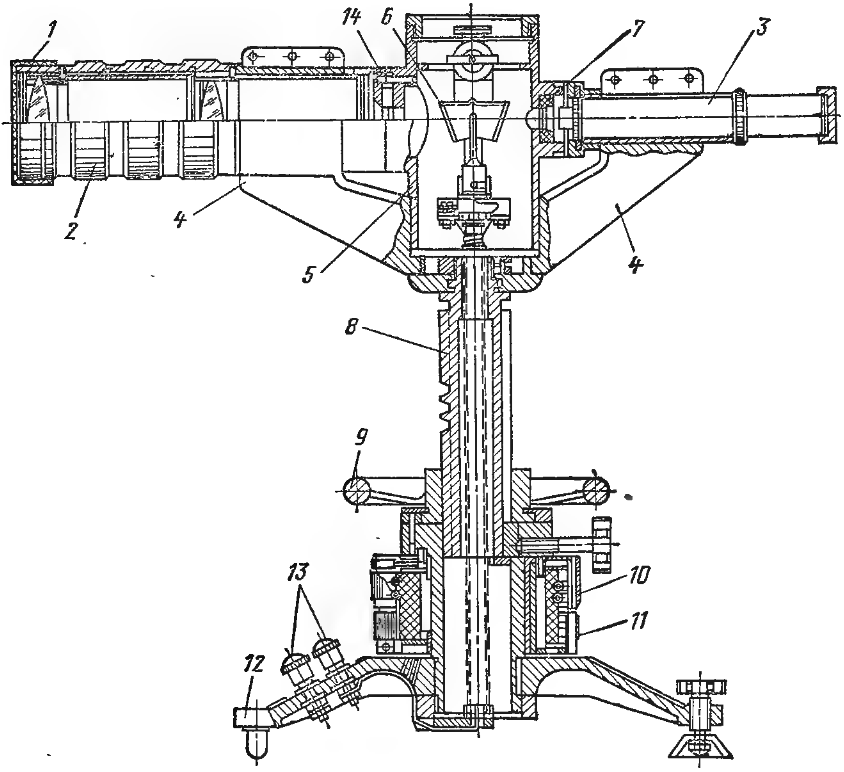


Рис. 7-3-5. Лабораторный оптический пирометр типа ОП.

Для измерения яркостной температуры выше 1400°С пирометр снабжен вращающейся обоймой *14* с поглощающими стеклами. Обойма имеет три отверстия и может быть установлена в три положения: при установке в первое фиксированное положение пирометр работает в диапазоне 900—1400°С; при повороте обоймы в следующее положение вводится первое поглощающее стекло для диапазона измерения 1400—2000°С; следующим поворотом обоймы вводится второе поглощающее стекло — для диапазона измерения 2000—3000°С.

Измерение силы тока, протекающего через нить пирометрической лампы, производится лабораторным потенциометром путем измерения падения напряжения на образцовом резисторе 0,1 Ом, включенном в цепь источника питания последовательно с нитью лампы.

Кроме рассмотренных, для измерения яркостной температуры применяется прецизионный оптический пирометр типа ЭОП [26].

Основные методические указания по применению оптических пирометров. При измерении яркостной температуры с помощью оптического пирометра необходимо учитывать, что коэффициент излучения тела ε_λ, как отмечалось выше, зависит не только от температуры тела и длины волны, но и в сильной степени от характера поверхности данного тела. Увеличение шероховатости поверхности реального тела приводит к возрастанию ε_λ. Различная степень окисления поверхности металла приводит к изменению коэффициента излучения. В силу этого для повышения надежности определения действительной температуры тела целесообразно было бы одновременно с измерением яркостной температуры производить и определение коэффициента излучения данного тела. Однако это является довольно трудоемким процессом и вследствие этого приходится пользоваться коэффициентами излучения тел, установленными для некоторых наиболее распространенных состояний их поверхности.

Коэффициенты излучения ε_λ некоторых тел для $\lambda = 0{,}65$ мкм приведены в [26]. Следует иметь в виду, что в различных конкретных условиях измерения одно и то же тело может иметь коэффициент излучения ε_λ, значительно отличающийся от табличных данных.

Вследствие указанных выше причин переход от яркостной температуры реального тела к его действительной температуре связан с возникновением методической погрешности от неточности подбора числового значения коэффициента ε_λ. Отклонение от действительного значения ε_λ может достигать $\pm$ (10—20)%. Погрешность при переходе от яркостной температуры к действительной, вызываемая неточностью значения ε_λ, может быть оценена по формуле, получаемой дифференцированием уравнения (7-3-14) по T и ε_λ:

$$\Delta T_\varepsilon = -\frac{\lambda_э}{c_2} T \frac{\Delta\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_\lambda}. \qquad (7\text{-}3\text{-}4)$$

При неточности подбора числового значения ε_λ, равной $\pm 15\%$ ($\Delta\varepsilon_\lambda/\varepsilon_\lambda = \pm 0{,}15$), и значениях $\lambda_э = 0{,}65$ мкм и $c_2 = 14{,}38 \cdot 10^3$ мкм·К погрешность ΔT_ε при переходе от яркостной температуры θ_λ к действительной T составит:

T, К	1100	2000	3000
ΔT_ε, К	$\pm$ 7,2	$\pm$ 27,1	$\pm$ 61

Выше было сказано, что оптическая плотность поглощающего стекла зависит от его температуры. Поэтому при применении оптических пирометров в помещениях с температурами, отличающими от 20 $\pm$ 5°C, необходимо учитывать возникновение дополнительной

погрешности измерений, значение которой зависит от марки поглощающего стекла и размера отклонения температуры стекла от нормальной области. Например, при измерении температуры $T = 3000$ К и температуре поглощающего стекла 35°С ($\Delta t = 10$°С) дополнительная погрешность ΔT составит для применяемых марок стекла:

Марка стекла	ПС-2	НС-13
ΔT, К	—6,8	11,6

Подсчет этого вида дополнительной погрешности для другого значения измеряемой температуры T_1, отличного от $T = 3000$ К, может быть произведен по формуле

$$\Delta T_1 = \left(\frac{T_1}{T}\right)^2 \Delta T. \qquad (7\text{-}3\text{-}5)$$

Следует иметь в виду еще одну причину, значительно влияющую на результаты измерения, которую довольно часто не учитывают, а именно: при измерении температуры нагретого тела, освещенного посторонним источником, яркостная температура этого тела, показываемая оптическим пирометром, не соответствует действительной яркостной температуре тела, так как к собственной его яркости, обусловленной излучением этого тела, добавляется яркость, отраженная телом. Эта дополнительная яркость, зависящая от степени освещенности тела посторонним источником, будет тем больше, чем больше коэффициент отражения поверхности нагретого тела. Погрешность, обусловленную влиянием отраженных лучей (возникновением дополнительной яркости), не представляется возможным учесть с достаточной достоверностью, так как кроме значения коэффициента отражения тела в данном направлении необходимо знать степень освещенности тела от постороннего источника света. Поэтому при измерении температуры нагретого тела необходимо стремиться так организовать измерения, чтобы степень освещения тела посторонним источником света была сведена к минимуму.

Погрешность измерения, обусловленная влиянием отраженных лучей, может иметь место, например, при измерении температуры деталей вскоре после их загрузки в печь, при неравномерном нагреве частей печного пространства и т. д. Если печь имеет хорошо изолированные стенки и достаточно большое время находилась при данной температуре, то внутри печи, между ее стенками и находящимися в ней деталями, устанавливается удовлетворительное лучистое равновесие, и такую печь можно рассматривать как своего рода модель черного тела. В этом случае яркостная температура печи, измеряемая с помощью оптического пирометра, будет близка к ее действительной температуре, какова бы ни была степень черноты излучения деталей, загруженных в печь.

При измерениях яркостных температур оптическим пирометром возможна также погрешность, обусловленная ослаблением видимой яркости нагретого тела вследствие рассеяния и поглощения лучей

в слое задымленного или запыленного воздуха, находящегося между пирометром и данным телом. Определить суммарный коэффициент ослабления слоя этого воздуха для данной длины волны в производственных условиях представляет большие трудности. Поэтому учесть эту погрешность в большинстве случаев затруднительно.

Во многих практических случаях, например при измерении температуры жидкого металла в ванне, имеет место большая неопределенность действительного значения коэффициента черноты излучения объекта ε_λ. Известно, что образование на поверхности жидкого металла пленки окислов в значительной степени увеличивает значение ε_λ визируемого зеркала металла и разность между яркостной температурой зеркала металла, измеренной оптическим пирометром, и его действительной температурой становится весьма неопределенной и меняющейся в процессе дальнейшего окисления поверхности металла.

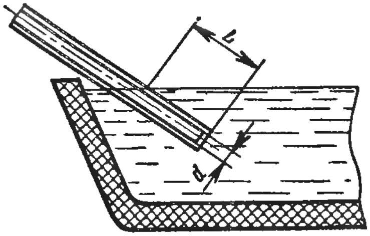


Рис. 7-3-6. Схема установки огнеупорной трубы в ванну жидкого металла.

В тех случаях, когда желательно, чтобы показания оптического пирометра непосредственно характеризовали действительную температуру тела и не было необходимости вводить недостаточно определенные поправки, используют искусственную полость черного тела.

В качестве примера искусственной полости черного тела на рис. 7-3-6 представлена схема введения в ванну с жидким металлом огнеупорной глухой трубы. Внутреннюю полость визирной трубы, погруженную в жидкий металл на достаточную глубину L, можно считать изотермичной.

Монохроматический коэффициент черноты излучения такой полости можно определить по формуле [26]:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \frac{\rho_\lambda}{1-\rho_\lambda}\frac{d^2}{4L^2},$$

где d — внутренний диаметр глухой трубы; ρ_λ — коэффициент отражения поверхности трубы.

Из этой формулы имеем

$$\frac{d}{L} = 2\sqrt{(1-\varepsilon_\lambda)\left(\frac{1}{\rho_\lambda} - 1\right)}. \qquad (7\text{-}3\text{-}6)$$

С помощью формулы (7-3-6) при известном ρ_λ можно определить значение отношения d/L, обеспечивающее требуемый коэффициент черноты излучения ε_λ полости. При применении этой формулы необходимо иметь в виду, что чернота полости определяется не только размером ее отверстия, но и степенью изотермичности ее стенок.

7-4. Фотоэлектрические пирометры

Фотоэлектрические пирометры являются автоматическими показывающими и записывающими приборами. Они позволяют измерять и записывать яркостную температуру неподвижных или движущихся тел, нагретых до видимого свечения, например температуры при высокочастотном нагреве, температуры прокатываемого металла и т. п.

Фотоэлектрические методы измерения яркостей широко используются в прецизионных фотоэлектрических установках, применяемых для научных исследований и эталонных работ в области оптической пирометрии. Фотоэлектрические методы позволили превзойти точность в измерении яркостей, которая была достигнута в визуальной оптической пирометрии, так как в последнем случае точность ограничена контрастной чувствительностью человеческого глаза.

В фотоэлектрических пирометрах в качестве приемника излучения (чувствительного элемента) используют фотоэлемент, фотосопротивление и т. п. При освещении фотоэлемента в цепи его возникает ток, пропорциональный световому потоку, испускаемому нагретым телом. Следует отметить, что применяемые фотоэлементы (сурьмяно-цезиевые, кислородно-цезиевые, с запирающим слоем и др.) обладают различной спектральной чувствительностью, которая зависит от типа фотоэлемента.

В зависимости от того, какой рабочий спектральный интервал используется в существующих фотоэлектрических пирометрах, они могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся фотоэлектрические пирометры, у которых при применении красного светофильтра с областью пропускания, начинающейся с длины волны около 0,6 мкм, используется сравнительно узкий рабочий спектральный интервал фотоэлемента — от 0,6 до 0,72 мкм. Благодаря этому у пирометров этого типа и у визуальных оптических пирометров эффективные длины волн практически совпадают. Градуировка и поверка фотоэлектрических пирометров этого типа производится с помощью температурных ламп, снабженных стеклом ПС-5 и градуированных на яркостные температуры в свете длины волны 0,65 мкм.

Поскольку эффективные длины волн указанных фотоэлектрических пирометров и визуальных оптических пирометров одинаковы, то яркостные температуры, измеренные этими приборами, будут совпадать в пределах их суммы допустимых основных погрешностей. Переход к действительным температурам тел от их яркостных температур, измеренных фотоэлектрическим пирометром, можно осуществлять с помощью уравнений (7-2-14) и (7-2-15) или специальных таблиц.

Широко применяемым фотоэлектрическим пирометром первой группы является прибор ФЭП-4 с нижним пределом измерения 800°С. Из числа выпускаемых фотоэлектрических пирометров за

границей к первой группе относятся, например, пирометры «Оптиматик» (США).

Ко второй группе относятся фотоэлектрические пирометры, использующие широкие спектральные области излучения. Эффективные длины волн у фотоэлектрических пирометров этого типа значительно различаются. Яркостные температуры, измеренные фотоэлектрическими пирометрами, со значительно различающимися эффективными длинами волн, характеризуются несравнимыми значениями. Широкие спектральные интервалы, используемые в фотоэлектрических пирометрах, исключают возможность осуществлять их градуировку и поверку с помощью температурных ламп, градуированных в свете какой-либо определенной длины волны. Поэтому фотоэлектрические пирометры второй группы градуируются и поверяются только по модели черного тела.

Переход от яркостных температур, измеренных фотоэлектрическими пирометрами этого типа, к действительной температуре физического тела представляет большие трудности, так как для этого необходимо знать значения коэффициентов излучения для эффективных длин волн, лежащих в различных интервалах длин волн. В настоящее время такие данные о значениях коэффициентов черноты излучения для большинства физических тел отсутствуют, а имеющиеся же данные значений ε_λ для некоторых длин волн, в частности, для $\lambda = 0{,}65$ мкм, далеко недостаточны.

Вследствие вышеизложенных причин фотоэлектрические пирометры второй группы применяются главным образом в тех случаях, когда по условию технологического процесса контроль температуры тел не требует знания действительной температуры. Однако необходимо отметить, что некоторые типы фотоэлектрических пирометров этой группы снабжаются графиком поправок, позволяющим осуществлять переход от показаний этих приборов к действительной температуре тела.

Ко второй группе относятся приборы ФЭП с нижним пределом измерения 500°С (с фотоэлементом ЦВ-3), АРС с фотоэлементом СУВ-3 и ряд других.

Для ознакомления с устройством фотоэлектрических пирометров в качестве примера рассмотрим применяемые пирометры ФЭП-4. В пирометрах этого типа с диапазоном измерения яркостной температуры от 800 до 4000°С используется вакуумный сурьмяно-цезиевый фотоэлемент типа СЦВ-51, чувствительный к излучению только видимой области спектра. На рис. 7-4-1 представлены кривые спектральной чувствительности сурьмяно-цезиевого фотоэлемента *1* и пропускания красного светофильтра *2*. Из этого графика видно, что фотоэлемент СЦВ-51 в сочетании с красным светофильтром КС-15 реагирует на излучение с длиной волны от 0,60 до 0,72 мкм. При этом эффективная длина волны пирометра в диапазоне измеряемых температур остается практически постоянной ($0{,}65 \pm 0{,}01$ мкм). Вследствие этого температура, показываемая фотоэлектрическим пирометром, как отмечалось выше, будет совпадать с яркостной

температурой, измеренной визуальным оптическим пирометром, в пределах суммы допускаемых основных погрешностей обоих приборов.

В пирометрах ФЭП с диапазоном измерения температуры от 500 до 1100°С применяется кислородно-цезиевый фотоэлемент ЦВ-3, чувствительный к излучению в области длин волн от 0,4 до 1,2 мкм. Эффективная длина волны этих пирометров 0,9—1,1 мкм. Температура, показываемая пирометром этого типа, несколько отличается от яркостной температуры, измеренной оптическим пирометром.

Пирометры ФЭП с фотоэлементом ЦВ-3 снабжаются графиком поправок, позволяющим определять действительную температуру тела по показаниям этих приборов.

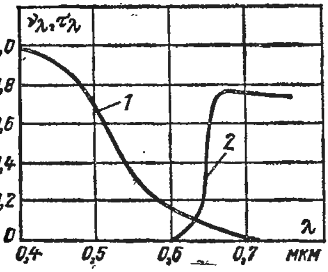


Рис. 7-4-1. Кривые спектральной чувствительности сурьмяно-цезневого фотоэлемента СЦВ-51 (*1*) и пропускания красного светофильтра (*2*).

Фотоэлектрический пирометр ФЭП-4 (рис. 7-4-2) состоит из следующих отдельных блоков: первичного преобразователя (визирной головки) *1*, включающего в себя фотоэлемент *2*, оптическую систему, модулятор света *3*, лампу обратной связи *4* и двухкаскадный электронный усилитель *5*; силового блока *6*; феррорезонансного стабилизатора напряжения *7*; быстродействующего автоматического потенциометра *8*; разделительного трансформатора *9*.

Изображение источника излучения *10* с помощью объектива *11* создается в плоскости отверстия *12* в держателе красного светофильтра *13*, установленного перед фотоэлементом *2*. Неподвижная диафрагма *14*, установленная за объективом, обеспечивает постоянство входного угла, а размер отверстия *12* определяет ту часть светового потока, которая создает освещенность катода фотоэлемента. При фокусировке изображение объекта *10*, которое рассматривается через визирное устройство, состоящее из окуляра *15* и наклонного зеркала *16*, должно полностью перекрывать отверстие *12*. В этом случае световой поток, падающий на катод фотоэлемента, зависит только от яркости объекта, а следовательно, и от яркостной температуры его.

Через второе отверстие *17* в держателе красного светофильтра на катод фотоэлемента подается световой поток от лампы *4*, питаемой током выходного каскада силового блока *6*. С помощью этой лампы в пирометре осуществляется обратная связь по световому потоку.

Перед держателем красного светофильтра, а вместе с тем и перед фотоэлементом установлена заслонка *18* модулятора света *3*. С помощью этого устройства световые потоки, падающие на катод фотоэлемента, от объекта и лампы обратной связи модулируются с час-

тотой 50 Гц в противофазе. При неравенстве этих световых потоков в цепи фотоэлемента потечет ток, переменная составляющая которого пропорциональна разности освещенностей катода обоими источниками. Переменная составляющая фототока усиливается электронным усилителем *5*, выпрямляется фазовым детектором силового блока *6* и подается на сетки ламп его выходного каскада-усилителя постоянного тока. В общую цепь катодов ламп этого выходного каскада включена последовательно лампа обратной связи. При этом в цепи этой лампы ток накала будет меняться до тех пор, пока на катоде фотоэлемента не уравняются световые потоки от источника излу-

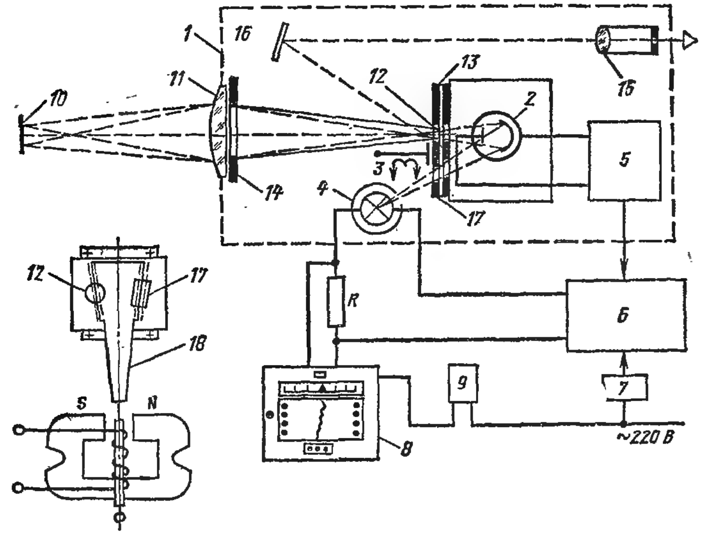


Рис. 7-4-2. Схема устройства фотоэлектрического пирометра типа ФЭП-4.

чения и лампы. Следует отметить, что световой поток от лампы обратной связи несколько отличается от потока визируемого объекта, однако благодаря большому коэффициенту усиления системы разность между этими потоками мала. Таким образом, с достаточной точностью можно считать, что сила тока в цепи лампы обратной связи однозначно связана с яркостной температурой визируемого тела. В цепь лампы обратной связи включен постоянный калиброванный резистор *R*, падение напряжения на котором измеряется быстродействующим автоматическим потенциометром, снабженным шкалой, позволяющей производить отсчет яркостной температуры, выраженной в градусах Цельсия.

Пределы допускаемой основной погрешности показаний пирометров с диапазоном измерения от 800 до 2000°С не превышают ±1% верхнего предела измерения. Для двушкальных пирометров с диапазоном измерения 1200—2000°С предел допускаемой основ-

ной погрешности ±20°С, а для второй шкалы с верхним пределом измерений выше 2000° С не превышает ±1,5% верхнего предела измерения. Время установления показаний пирометра около 1 с. Порог чувствительности пирометра составляет 0,1% верхнего предела измерения прибора.

7-5. Пирометры спектрального отношения

Пирометры спектрального отношения или цветовые фотоэлектрические пирометры применяются для автоматического измерения температуры в металлургической и в других отраслях промышленности, а также в практике научных исследований.

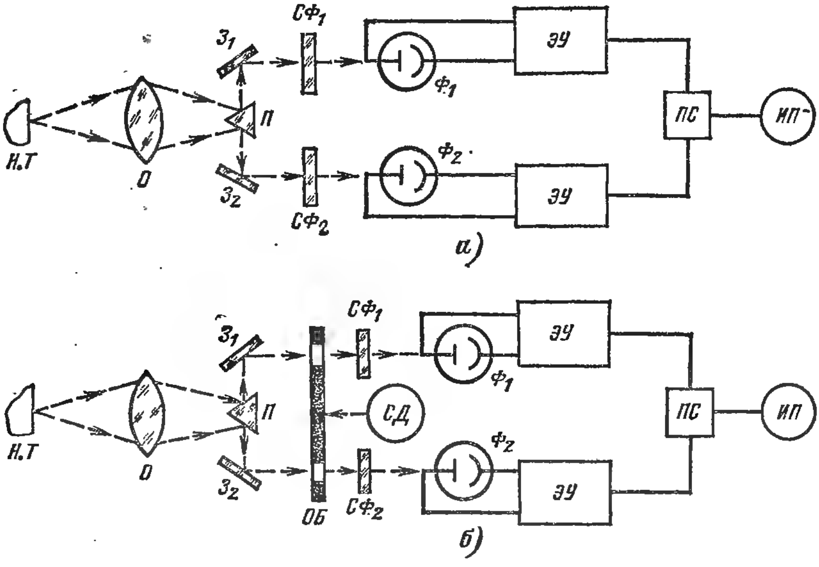


Рис. 7-5-1. Схемы двухканальных пирометров спектрального отношения.

НТ — нагретое тело; *О* — объектив; *П* — призма, $З_1$ и $З_2$ — зеркала; *ОБ* — обтюратор; *СД* — синхронный двигатель; $СФ_1$ и $СФ_2$ — красный и синий светофильтры; $Ф_1$ и $Ф_2$ — фотоэлементы; *ЭУ* — электронный усилитель; *ПС* — пересчетная схема; *ИП* — измерительный прибор.

Пирометры спектрального отношения основаны на зависимости от температуры тела отношения спектральных энергетических яркостей в двух участках спектра с определенными значениями эффективных длин волн. В зависимости от того, используется ли для каждой из спектральных яркостей отдельный приемник (фотоэлемент, фотодиод и т. п.) или обе яркости воздействуют на один и тот же приемник поочередно, пирометр выполняется по двухканальной или одноканальной схеме.

На рис. 7-5-1 приведены принципиальные схемы двухканальных пирометров спектрального отношения. В схеме пирометра (рис.

7-5-1, *а*) излучение от нагретого тела после объектива с помощью призмы раздваивается и направляется через светофильтры (например, красный и синий) на два фотоэлемента. Сигналы фотоэлементов, усиленные усилителями, подаются на пересчетную схему, выполняющую функции делительного звена; в качестве измерительного прибора может быть использован автоматический потенциометр. В качестве пересчетной схемы можно применить и логарифмический делитель. В этом случае используется то обстоятельство, что логарифм отношения спектральных яркостей пропорционален обратному значению цветовой температуры.

Зависимость логарифма отношения двух спектральных яркостей $B_0(\lambda_к, T)$ и $B_0(\lambda_с, T)$ в участках спектра, характеризуемых соответственно эффективными длинами волн $\lambda_к$ и $\lambda_с$, от обратного значения цветовой температуры $T_ц$ на основании формулы (7-2-10) может быть приведена в виде

$$\ln\frac{B_0(\lambda_к T_ц)}{B_0(\lambda_с, T_ц)} = c_2\left(\frac{1}{\lambda_с} - \frac{1}{\lambda_к}\right)\frac{1}{T_ц} - 5\ln\frac{\lambda_к}{\lambda_с}. \qquad (7\text{-}5\text{-}1)$$

Деление в пересчетной схеме может быть осуществлено включением в каждый канал логарифмирующих звеньев и вычитанием полученных сигналов. Таким образом, разность сигналов, измеренная потенциометром, будет являться обратным значением измеряемой цветовой температуры.

Недостатком рассмотренной схемы пирометра является зависимость характеристик от стабильности преобразующих элементов каждого канала.

Схема двухканального пирометра спектрального отношения (рис. 7-5-1, *б*) имеет дисковый обтюратор, служащий для модуляции потока лучистой энергии. Наличие в схеме прибора модулятора света позволяет использовать более стабильные усилители переменного тока, однако нестабильность фотоэлементов и здесь может служить источником погрешностей. Обработка сигналов, поступающих с фотоэлементов, ведется так же, как и в схеме рис. 7-5-1, *а*.

В одноканальных пирометрах два различных монохроматических потока лучистой энергии подаются попеременно на один фотоэлектрический приемник в большинстве случаев с помощью дискового обтюратора (оптического коммутатора), в отверстиях которого расположены соответствующие светофильтры (например, красный и синий). Одноканальный принцип измерения повышает стабильность характеристик пирометров при снижении требований к постоянству характеристик элементов схемы. Поэтому созданные за последние годы пирометры спектрального отношения в большинстве случаев выполнены по одноканальной схеме.

Из числа новых пирометров, выполненных по одноканальной схеме, заслуживает большого внимания пирометр спектрального отношения ПИТ-1, созданный в Институте металлургии им. А. А. Байкова АН СССР под руководством Д. Я. Свет, для измерения истинной (действительной) температуры нагретых тел [65]. Этот пирометр

является первым в мировой практике автоматическим прибором для измерения действительной температуры стали, чугуна, алюминия и других металлов, показания которого не зависят от того, является ли поверхность металла чистой, либо частично или полностью покрыта окисной пленкой.

Пирометр ПИТ-1 основан на принципиально новом методе получения информации о лучеиспускательной способности излучающей поверхности. В основе этого метода, реализованного в пирометре для измерения действительной температуры по отношению спектральных энергетических яркостей $B(\lambda_i, T)$ и $B(\lambda_j, T)$ при неизменной и изменяющейся лучеиспускательной способности, лежит установленная в [66—68] закономерность между длинами волн теплового излучения (λ_i, λ_j) тел и их излучательной способностью (ε_i, ε_j), позволяющая получить информацию об ε независимо от температуры в виде инвариантных спектральных распределений:

$$J(\lambda_i, \lambda_j) = \sum_j^m P_j \ln B(\lambda_j, T) - \sum_i^n P_i \ln B(\lambda_i, T);$$

$$\frac{\partial J(\lambda_i, \lambda_j)}{\partial T} = 0, \quad \text{если} \quad \sum_j^m P_j \lambda_j^{-1} = \sum_i^n P_i \lambda_i^{-1}.$$

Для двух составляющих $n = m = 1$, $P_i = \lambda_i^\circ$ и $P_j = \lambda_j^\circ$, где λ_i° и λ_j — безразмерные значения длин волн λ_i и λ_j.

Инвариант $J(\lambda_i, \lambda_j)$ позволяет определить ε_i и ε_j непосредственно по значению спектральных составляющих, если функцию $\varepsilon(\lambda)$ аппроксимировать полиномом n-й степени. Таким образом, принципиально методическая погрешность за счет изменения лучеиспускательной способности объекта, температура которого измеряется, может быть исключена. При числе измеряемых спектральных составляющих меньше, чем степень аппроксимирующего полинома, минимизация методической погрешности с помощью $J(\lambda_i, \lambda_j)$ может быть осуществлена за счет использования априорной информации об ε_i и ε_j.

В автоматическом пирометре ПИТ-1 используются всего две спектральные составляющие $B(\lambda_1, T)$ и $B(\lambda_2, T)$ с эффективными длинами волн λ_1 и λ_2, выделяемые с помощью вращающегося перед приемником излучения обтюратора с двумя светофильтрами. Информация об ε, извлекаемая в процессе измерения непосредственно из энергии излучения поверхности, автоматически по найденому алгоритму вычисляется в виде некоторой функции $F(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, где ε_1 и ε_2 — значения спектральных коэффициентов излучения для эффективных длин волн λ_1 и λ_2.

В рассматриваемом пирометре, представляющем собой самокорректирующееся оптикоэлектронное устройство, реализуется указанный выше инвариантный алгоритм в виде

$$J(\lambda_1, \lambda_2) = (\lambda_2 \ln \varepsilon_2 - \lambda_1 \ln \varepsilon_1 + A_0) D_0,$$

где A_0 и D_0 — постоянные коэффициенты.

Для практической реализации метода измерения действительной температуры в вычислитель поправок электронного блока пирометра ПИТ-1 заранее (при его градуировке) вводится необходимый объем априорной информации о возможных значениях спектральных коэффициентов излучения поверхности, хранящихся в памяти прибора в виде ряда значений температурных поправок, соответствующих изменению излучательной способности поверхности жидкого металла, например от чисто зеркальной до полностью окисленной.

Схема устройства пирометра действительной температуры. Пирометр ПИТ-1 (рис. 7-5-2) состоит из первичного преобразователя, электронного блока, автоматического потенциометра КСП4 или

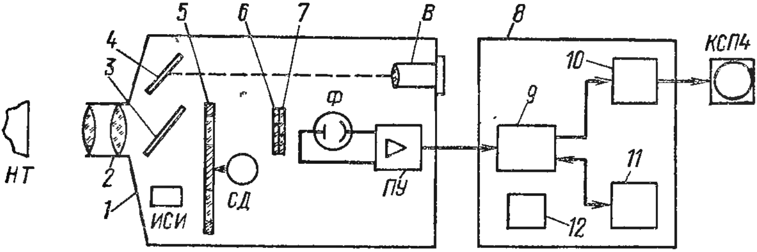


Рис. 7-5-2. Схема устройства пирометра действительной температуры ПИТ-1.

НТ — нагретое тело; *1* — первичный преобразователь; *2* — объектив; *3* — полупрозрачное зеркало; *4* — зеркало; *5* — обтюратор; *6* и *7* — селективные поглощающие стекла; *8* — электроииый блок; *9* — измерительный преобразователь; *10* — сумматор сигналов; *11* — вычислитель поправок по измеренным значеииям фуикции F (ε_1, ε_2); *12* — источиик питаиия; *СД* — синхроиий двигатель; *Ф* — фотоэлемент Ф-15; *ПУ* — предварительный усилитель; *В* — визириое устройство; *ИСИ* — источиик стандартиого излучения; *КСП4* — автоматический потеициометр.

другого типа и стабилизатора напряжения, который на схеме не показан.

В первичном преобразователе в качестве приемника энергии излучения используется фотоэлемент с мультищелочным катодом Ф-15 (или фотодиод). Спектральная чувствительность мультищелочного фотоэлемента удовлетворяет требованиям стабильности по «красно-синему» отношению в течение длительного времени. Высокая температурная стабильность спектрального отношения фотоэлемента Ф-15 позволяет применять его в пирометрах без специального термостатирования [64].

Энергия излучения нагретого тела, действительная температура которого измеряется, поступает через объектив, полупрозрачное зеркало, обтюратор, вращаемый синхронным двигателем, и поглощающие стекла на фотоэлемент. Обтюратор выполнен в виде диска с двумя отверстиями, одно из которых закрыто красным светофильтром, другое — синим. Поэтому на фотоэлемент при вращении обтюратора попеременно попадает излучение красной и синей спектральной яркостей. Сигналы фотоэлемента, пропорциональные

спектральным яркостям и усиленные предварительным усилителем, подаются по кабелю на вход преобразователя электронного блока.

По измеренным значениям функции $F(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ из массива априорной информации в канал вычислителя цветовой температуры $T_ц$, находящегося в преобразователе, с помощью логического устройства вычислителя поправок синхронно вводится соответствующее значение температурных поправок ΔT через каждые 0,02 с. С выхода преобразователя сигналы, пропорциональные $T_ц$ и ΔT, поступают на вход сумматора. На вход автоматического потенциометра КСП4 с выхода сумматора подается суммарный сигнал цветовой температуры $T_ц$ с поправкой ΔT. В каждый момент времени вторичный прибор КСП4 пирометра показывает и записывает значение действительной температуры $T_д = T_ц - \Delta T$.

В процессе работы пирометра правильность градуировки его может быть проверена по встроенному в первичный преобразователь источнику стандартного излучения ИСИ и при необходимости откорректирована с помощью селективного поглощающего стекла 7.

Первичный преобразователь имеет устройства для охлаждения и для отдува дыма с помощью сжатого воздуха или инертного газа.

Пирометр ПИТ-1 рассчитан на диапазон измерения действительных температур 800—2000°С. Для контроля действительных температур чугуна и стали пирометр имеет диапазон измерения 1350—1650°С.

Суммарная погрешность измерения действительных температур при изменении коэффициента лучеиспускательной способности излучающей поверхности от 0,3 до 1 не превышает ±1% нормирующего значения.

Угол визирования преобразователя пирометра $^1/_5$—$^1/_{500}$ в зависимости от диапазона температур. У варианта пирометра для измерения действительной температуры стали минимальный угол визирования не более $^1/_{50}$.

Пирометр типа ПИТ-1, использующий инфракрасную область спектра, имеет нижний предел измерения температуры 300°С.

7-6. Пирометры полного излучения

Для измерения радиационных температур нагретых тел в промышленных и лабораторных условиях применяют пирометры полного излучения (радиационные пирометры). Комплект пирометра состоит из первичного преобразователя (телескопа), одного или двух вторичных приборов и вспомогательных устройств.

Действие пирометров полного излучения основано на зависимости от температуры полной энергетической яркости тела, описываемой формулой Стефана — Больцмана (7-2-13). Первичный преобразователь пирометра должен быть снабжен теплочувствительным элементом и оптической системой, концентрирующей лучистую энергию тела, на теплочувствительном элементе, степень нагрева

которого, а вместе с тем и выходной сигнал его определяют радиационную температуру тела.

В качестве теплочувствительного элемента в большинстве случаев применяют миниатюрную термобатарею из нескольких последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей (например, хромель-копелевых или др.). Термобатарея в радиационных пирометрах старых выпусков помещалась в защитную стеклянную колбу. В пирометрах полного излучения, выпускаемых в настоящее время, применяют открытую термобатарею, т. е. без защитной стеклянной колбы, что значительно уменьшает инерционность первичного преобразователя пирометра.

Для концентрации лучистой энергии, исходящей из источника на теплочувствительный элемент, первичные преобразователи пирометров обычно снабжаются рефракторной оптической системой (собирающей линзой). При небольших мощностях лучистой энергии и, следовательно, невысоких температурах тел для концентрации энергии применяют рефлекторную оптическую систему (вогнутое зеркало). Применение собирающей линзы или зеркала способствует увеличению потока энергии, попадающего на теплочувствительный элемент приемника, что повышает значение его выходного сигнала. Наибольшее распространение имеют первичные преобразователи (телескопы) с рефракторной оптической системой. Применяемые в настоящее время пирометры полного излучения позволяют измерять температуру в диапазоне от 400 до 3500°С. Столь широкий интервал измеряемых температур обусловливает необходимость изготовлять линзы телескопов из оптических материалов, наиболее прозрачных для лучей тех длин волн, которые преимущественно испускаются нагретыми телами в данном рабочем интервале температур. Это особенно важно при измерении относительно невысоких температур, так как в этом случае излучаемая нагретым телом энергия невелика и поэтому необходимо, по возможности без потерь, довести ее до теплочувствительного элемента первичного преобразователя пирометра.

Для преобразователей пирометров с диапазоном измерения температуры от 400 до 1500°С применяют линзы из стекла марки КИ, а с диапазоном измерения от 900 до 3500°С используют линзы из стекла марки К8.

В качестве вторичных показывающих, самопишущих и регулирующих приборов, работающих в комплекте с первичными преобразователями пирометров, используются милливольтметры и автоматические потенциометры типа КСП3, КСП4 и др., имеющие соответствующую градуировку. Устройство этих приборов в принципиальной своей части аналогично устройству рассмотренных выше приборов. Вторичные приборы обычно снабжают шкалой, позволяющей отсчитывать непосредственно радиационную температуру, выраженную в градусах Цельсия.

Предел допустимой основной погрешности пирометров полного излучения (радиационных пирометров) в области темпе-

ратур от 500 до 2500°C находится в интервале 7,5—30°C (ГОСТ 6923-74).

Для ознакомления с действием и устройством пирометра полного излучения рассмотрим упрощенную схему этого прибора (рис. 7-6-1).

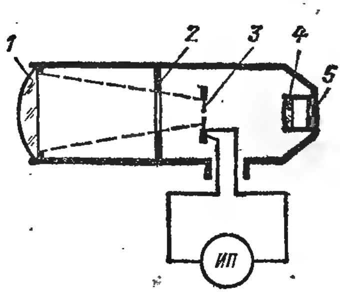


Рис. 7-6-1. Схема устройства пирометра полного излучения.

Пирометр состоит из первичного преобразователя (телескопа) с рефракторной оптической системой и измерительного прибора *ИП* (милливольтметра или автоматического потенциометра). Изображение объекта, температура которого измеряется, создается в телескопе с помощью линзы объектива *1* в плоскости, лежащей за диафрагмой *2*. В этой плоскости расположена термобатарея *3*, являющаяся приемником лучистой энергии, а вместе с тем и преобразователем ее в термо-э. д. с. Лучи, выходящие из различных точек поверхности объекта и попадающие в линзу объектива, концентрируются на рабочей поверхности термобатареи, ограниченной отверстием диафрагмы *2*. Термо-э. д. с. термобатареи, устанавливающаяся в результате воздействия на нее потока лучистой энергии и теплообмена с окружающими деталями, измеряется прибором *ИП*.

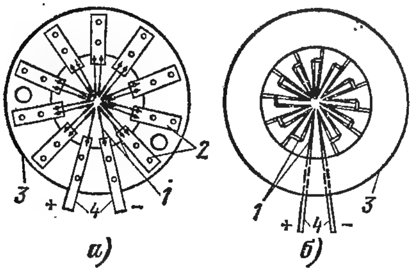


Рис. 7-6-2. Термобатареи преобразователя пирометра полного излучения.

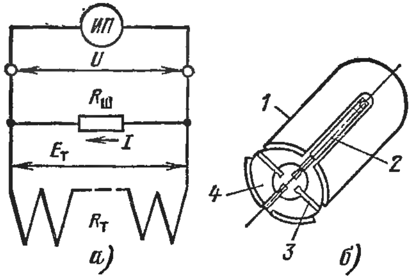


Рис. 7-6-3. Способы температурной компенсации, применяемые в преобразователях пирометров полного излучения.

Примеры конструктивного выполнения открытых термобатарей представлены на рис. 7-6-2. Рабочие концы термоэлектрических преобразователей *1* у этих термобатарей расположены по кругу в центре слюдяного кольца *3*, а свободные их концы закреплены с помощью тонких металлических пластин *2* на том же слюдяном кольце (рис. 7-6-2, *а*) или непосредственно с помощью слюдяных колец *3* (рис. 7-6-2, *б*). Выводы *4* термобатарей соединяются с зажимами первичного преобразователя. Рабочая поверхность термо-

батарей, на которую подается поток лучистой энергии, зачернена платиновой чернью.

Свободные концы термоэлектрических преобразователей термобатареи находятся обычно в тепловом контакте с корпусом первичного преобразователя (телескопа), градуировка и поверка которого производятся при температуре 20±2°C. При отклонениях температуры корпуса телескопа от градуировочной температуры показания пирометра будут неправильными. Возникающие при этом дополнительные погрешности могут достигать больших значений. Для снижения этого вида погрешностей измерения первичные преобразователи пирометров снабжаются различными устройствами температурной компенсации.

На рис. 7-6-3, *а* приведена схема, иллюстрирующая распространенный способ температурной компенсации с помощью электрического шунта $R_ш$, изготовляемого из меди или никеля. Резистор $R_ш$, шунтирующий термобатарею с сопротивлением $R_т$, помещают в корпусе первичного преобразователя рядом со свободными концами термоэлектрических преобразователей термобатареи. В зависимости от значения термо-э. д. с. $E_т$ термобатареи ток I, протекающий в ее цепи, создает на резисторе $R_ш$ падение напряжения

$$U = IR_ш = \frac{E_т}{R_т/R_ш + 1}, \qquad (7\text{-}6\text{-}1)$$

которое измеряется с помощью прибора *ИП*. При возрастании температуры корпуса преобразователя пирометра и соответствующем увеличении сопротивления резистора $R_ш$, как видно из выражения (7-6-1), падение напряжения U повышается и благодаря этому создается возможность (при правильно выбранном начальном значении $R_ш$) значительно скомпенсировать уменьшение термо-э. д. с. термобатареи, а тем самым снизить дополнительные погрешности измерения при нагревании телескопа в рабочем интервале от 0 до 100°C.

Рассмотренный способ температурной компенсации с помощью медного резистора применяют в отечественном первичном преобразователе пирометра полного излучения (радиационного пирометра) типа РАПИР и в ряде пирометров, выпускаемых зарубежными фирмами.

Рассмотрим другой распространенный способ температурной компенсации с помощью биметаллического компенсатора, устройство которого схематично показано на рис. 7-6-3, *б*. В пазах корпуса компенсатора *1* первичного преобразователя расположены четыре биметаллические пластины *2*, прикрепленные одним концом к его корпусу. К свободным концам биметаллических пластин приварены тонкие профилированные заслонки *3*, частично перекрывающие площадь отверстия диафрагмы *4* перед термобатареей. При повышении температуры корпуса первичного преобразователя биметаллические пластины деформируются и постепенно выводят заслонки из отверстия диафрагмы, вследствие чего увеличивается поток лу-

чистой энергии, попадающей на рабочую поверхность термобатареи. Это позволяет компенсировать уменьшение термо-э. д. с. термобатареи, обусловленное нагреванием корпуса первичного преобразователя, а вместе с тем и свободных концов термоэлектрических преобразователей термобатареи. Такой способ температурной компенсации применен в первичном преобразователе пирометра типа ПРК-600.

Дополнительная погрешность первичного преобразователя пирометров полного излучения вызвана отклонением температуры его корпуса от градуировочной (20±2°С), не превышает приведенных ниже значений (ГОСТ 6923-74).

Температура корпуса телескопа, °С	5	10	20	40	60	80	100
Допускаемое изменение показаний телескопа пирометра, °С	±4,5	±3	0	±4	±8	±13	±18

Эти данные говорят о том, что первичные преобразователи пирометров даже при наличии температурной компенсации характеризуются значительными допускаемыми дополнительными погрешностями, а применяемые в первичных преобразователях пирометров способы температурной компенсации требуют дальнейшего усовершенствования. В промышленных условиях для снижения изменений показаний, вызываемых нагревом корпуса первичного преобразователя, последний помещается в защитный кожух, охлаждаемый проточной водой.

При измерении температуры пирометром полного излучения наводка первичного преобразователя производится при помощи визирного устройства *4* (рис. 7-6-1). В целях защиты глаза при наводке на излучатель, имеющий высокую температуру, перед линзой устанавливают цветное защитное стекло *5*. При наводке первичного преобразователя пирометра необходимо добиться такого положения, чтобы видимое через окуляр изображение объекта полностью перекрывало отверстие диафрагмы перед термобатареей. При правильной фокусировке преобразователя пирометра рабочая поверхность термобатареи находится в центре видимого изображения.

Минимальный размер излучателя, при котором изображение его полностью перекрывает отверстие диафрагмы перед термобатареей, определяется углом визирования объектов пирометрических преобразователей. Угол визирования объектов пирометрических преобразователей характеризуется значением показателя визирования, т. е. отношением диаметра круга D, вписанного в проекцию контура излучателя на плоскость, перпендикулярную оптической оси преобразователя, к расстоянию от излучателя до объектива преобразователя L, при котором изображение излучателя полностью перекрывает отверстие диафрагмы перед термобатареей.

Так как значение показателя визирования зависит от расстояния между излучателем и объективом, первичные пирометрические преобразователи принято характеризовать номинальным показателем визирования, который определяется на расстоянии $L = 1000$ мм.

Пирометрические преобразователи в зависимости от значения номинального показателя визирования D/L подразделяются: на широкоугольные — показатель визирования более $^1/_{16}$, на узкоугольные — показатель визирования $^1/_{16}$ и менее.

При применении различных типов первичных преобразователей пирометров полного излучения необходимо иметь в виду, что они являются в той или иной степени селективными приемниками излучения. Вследствие этого пирометры различных типов, дающие одинаковые показания при наведении на черное тело, будут давать различные показания при измерении температуры селективного излучателя.

Первичные пирометрические преобразователи типа ТЕРА-50. Преобразователи (телескопы) ТЕРА-50 пирометров полного излучения (радиационных пирометров) типа РАПИР позволяют измерять температуру поверхности нагретых тел от 400 до 2500°С. Первичные преобразователи ТЕРА-50 снабжены объективами с номинальным показателем визирования $^1/_{20}$ или $^1/_7$. Таким образом, при расстоянии излучателя от объектива $L = 1000$ мм узкоугольный телескоп воспринимает излучение с поверхности нагретого тела диаметром 50 мм, а широкоугольный 143 мм.

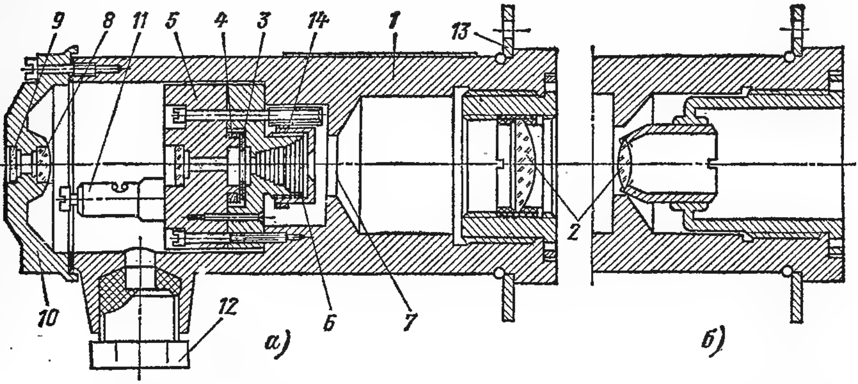


Рис. 7-6-4. Первичные преобразователи пирометра типа РАПИР.

а — узкоугольный преобразователь типа ТЕРА-50; *б* — оптическая система широкоугольного преобразователя типа ТЕРА-50.

Устройство узкоугольного пирометрического преобразователя ТЕРА-50 показано на рис. 7-6-4, *а*. Здесь *1* — корпус телескопа; *2* — линза объектива, вмонтированная в оправу; *3* — термобатарея; *4* — компенсационный медный резистор, шунтирующий термобатарею (см. рис. 7-6-3, *а*); *5* — корпус термобатареи, состоящий из основания с укрепленной на нем термобатареей, и фланца с резьбовым отростком; *6* — подвижная диафрагма; *7* — неподвижная диафрагма; *8* — линза визирного устройства; *9* — защитное стекло; *10* — крышка; *11* — контактный винт; *12* — штуцер для вывода проводов; *13* — фланец для крепления телескопа к защитной арматуре.

В целях получения стандартной градуировочной характеристики пирометрических преобразователей на заводе-изготовителе производят подгонку напряжения на его зажимах, перемещая диафрагму *6* вдоль резьбового отростка фланца. Для этой цели на наружной поверхности подвижной диафрагмы сделан зубчатый венец, зубья которого постоянно сцеплены с зубьями трибки *14*. При помощи трибки производится перемещение диафрагмы вдоль резьбового отростка фланца. Вращение трибки при градуировке производится вручную отверткой со стороны основания корпуса термобатареи, куда выведена ось трибки со шлицем. После градуировки шлиц пломбируется.

Широкоугольный первичный пирометрический преобразователь типа ТЕРА-50 отличается от рассмотренного узкоугольного преобразователя только тем, что в нем применяется в качестве объектива двояковыпуклая линза *2* с фокусным расстоянием меньшим, чем в узкоугольном (рис. 7-6-4, *а*). Остальные узлы широкоугольного преобразователя такие же, как и в узкоугольном.

Пирометрические преобразователи ТЕРА-50 могут работать в комплекте с милливольтметрами (одним или двумя) или с милливольтметром и одним автоматическим потенциометром, а также с одним или двумя автоматическими потенциометрами.

В последнем случае для обеспечения единства градуировки и взаимозаменяемости пирометрических преобразователей необходимо учитывать, что милливольтметры работают с потреблением мощности. Поэтому градуировка этих преобразователей производится при максимальной расчетной внешней его нагрузке, т. е. при включении телескопа через линии проводов, имеющие предельно допускаемые расчетные значения сопротивления, одновременно на два милливольтметра, подключенных параллельно. При таком включении милливольтметров будет иметь место наибольшее расчетное допускаемое снижение градуировочной характеристики по сравнению с градуировочной характеристикой ненагруженного пирометрического преобразователя.

При установке пирометра РАПИР доведение внешней нагрузки первичного преобразователя до заданного значения независимо от реального сопротивления линии того или иного сочетания вторичных приборов осуществляется с помощью панели ПУЭС-64 с уравнительными и эквивалентными манганиновыми резисторами. Эту панель, входящую в комплект пирометра, обычно называют панелью взаимозаменяемости.

Известно, что при измерении пирометрами полного излучения температур реальных тел показания их оказываются заниженными ($T_р < T$) на значение тем большее, чем выше измеряемая температура и чем ниже коэффициент излучения ε_T. Методическая погрешность пирометра, возникающая вследствие этих причин, может быть скорректирована для конкретных условий, если имеется возможность с достаточной точностью определить значение коэф-

фициента излучения или измерить действительную температуру объекта каким-либо другим прибором, например термоэлектрическим термометром. Для целей корректировки милливольтметры и автоматические потенциометры (рис. 4-18-1, *а*), предназначенные для работы с преобразователями пирометров, снабжаются корректирующими резисторами.

При корректировании показаний пирометра рассматриваемым способом необходимо учитывать, что между напряжением на зажимах телескопа и радиационной температурой объекта не имеется линейной зависимости. Поэтому переход от отсчитанного по шкале прибора значения радиационной температуры объекта к его действительной температуре для всех точек шкалы не может быть осуществлен прямым изменением сопротивления корректирующего резистора. Этот способ позволяет корректировать показания пирометра только в какой-либо одной точке шкалы прибора и может быть, следовательно, использован только при измерении стационарных температур объектов. Если при измерении меняющихся температур корректирование выполнено по одной точке шкалы, то по мере отклонения показаний прибора от этой точки возникает все увеличивающаяся погрешность определения действительных температур.

В автоматических потенциометрах корректирующий резистор включен в его измерительную схему (рис. 4-18-1, *а*). Резистор $R_{кр}$, ручка которого вынесена на лицевую панель потенциометра, позволяет изменять приведенное сопротивление реохорда измерительной схемы, а следовательно, чувствительность и в конечном счете диапазон измерения прибора.

Основные методические указания по применению пирометров полного излучения. При измерении температуры с помощью пирометра полного излучения могут возникать методические погрешности вследствие ряда причин. Наиболее существенной методической погрешностью является погрешность, возникающая при переходе от радиационной к действительной температуре тела, которая осуществляется с помощью формулы (7-2-19). Надежность определения по этой формуле действительной температуры тела по его радиационной температуре зависит от погрешности значения коэффициента излучения ε_T. Подбор этого значения по имеющимся в литературе таблицам может быть произведен с погрешностью не менее ± 10—20%, а в некоторых случаях она может быть значительно больше (± 30—50%). Наличие такой погрешности объясняется тем, что значение ε_T зависит от химического состава тела, температуры и состояния поверхности излучателя. На значение ε_T металлической поверхности сильно влияет степень ее окисленности. Коэффициент излучения окисленной поверхности всегда выше, чем неокисленной. Например, для неокисленного никеля при 1200°C $\varepsilon_T \approx 0{,}063$, а при той же температуре для окисленного никеля $\varepsilon_T = 0{,}85$. Следует также указать, что шероховатые поверхности обладают большим значением ε_T, чем гладкие.

Погрешность в подборе значения ε_T вызывает методическую погрешность в определении действительной температуры реального тела по его радиационной температуре, полученной в результате измерения. Эта погрешность может быть вычислена по формуле, полученной логарифмированием и последующим дифференцированием уравнения (7-2-19):

$$\Delta T_\varepsilon = -\frac{1}{4} T \frac{\Delta\varepsilon_T}{\varepsilon_T}. \qquad (7\text{-}6\text{-}2)$$

Рассмотрим примеры, характеризующие погрешность, вызванную неточностью определения ε_T. Полагая $T = 1200$ К и $\Delta\varepsilon_T/\varepsilon_T = \pm 0,1$, получим $\Delta T_\varepsilon = \pm 30$ К, а при той же температуре и $\Delta\varepsilon_T/\varepsilon_T = \pm 0,15$ значение погрешности в определении действительной температуры возрастает до $\Delta T_\varepsilon = \pm 45$ К. При $T = 1500$ К и $\Delta\varepsilon_T/\varepsilon_T = \pm 0,2$ погрешность $\Delta T_\varepsilon = \pm 75$ К, а при той же температуре и $\Delta\varepsilon_T/\varepsilon_T = \pm 0,3$ $\Delta T_\varepsilon = \pm 113$ К.

Такого вида методическая погрешность может быть значительной особенно при визировании первичного преобразователя пирометра на открытую поверхность тела, например при измерении температуры металла во время прокатки, ковки и т. п.

Если преобразователь пирометра визируется на внутреннюю поверхность огнеупорной кладки печи через отверстие в ее стенке или через специальную фурму, установленную для этой цели в стенке или своде печи, и внутренние поверхности кладки печи имеют практически одинаковую температуру, то закрытое печное пространство по свойствам излучения близко к полости черного тела. В этом случае показания пирометра в пределах погрешностей измерений совпадают с показаниями термоэлектрического термометра, введенного в печное пространство, или с показаниями оптического пирометра, наведенного на ту же поверхность.

Такие же условия будут иметь место при измерении действительной температуры внутри печи, если первичный преобразователь визируется на дно огнеупорной трубки (карборундовой, стальной или из другого материала), введенной через стенку внутрь печи на достаточную глубину. Требования к глубине погружения огнеупорной трубки, а следовательно, и к ее геометрическим размерам, те же, что и для полости, показанной на рис. 7-3-6.

Методические погрешности при измерении температур объектов пирометром полного излучения могут возникать также вследствие влияния водяных паров и углекислоты в слое воздуха, находящегося между объектом и преобразователем. Это влияние обусловливается поглощением водяными парами и углекислым газом лучистой энергии в некоторых участках инфракрасной области спектра. Следует отметить, что показания пирометра очень чувствительны к запыленности и задымленности воздуха, находящегося между пирометрическим преобразователем и объектом. В этом случае также может иметь место методическая погрешность, обусловленная ослаблением всех длин волн спектра пучка лучей, идущих от объекта к преоб-

разователю вследствие рассеяния его на крупных частицах (копоти, пыли), взвешенных в слое воздуха между преобразователем и объектом.

При измерении температуры кладки печи и в других подобных случаях для удаления дыма, копоти и пыли из пространства визирной трубы или фурмы перед пирометрическим преобразователем производят отдувку сжатым воздухом. В некоторых случаях во внутреннюю полость визирной арматуры подают сжатый воздух низкого давления или инертный газ для создания противодавления, препятствующего проникновению дыма, пыли и копоти через визирную трубу или фурму из рабочего объема печи. В том и другом случае воздух должен быть очищен от пыли, масла и влаги соответствующими фильтрами.

Другая причина дополнительных погрешностей, на которую необходимо обратить внимание, связана с нагревом корпуса преобразователя вследствие теплообмена с окружающим его воздухом и телами и за счет поглощения излучения источника, температура которого измеряется. Чтобы избежать этих погрешностей, применяют специальную защитную арматуру с водяным охлаждением.

Устройство защитной арматуры первичного преобразователя пирометра, разработанной с расчетом обеспечить возможность применения его в различных условиях эксплуатации, защищая преобразователь от пыли, дыма, действия высоких температур окружающего воздуха, бросков пламени из печи и т. д., описывается в монтажно-эксплуатационных инструкциях на пирометры.

При измерении температуры пирометрами полного излучения необходимо иметь в виду, что тепловой баланс между термобатареей, окружающими ее деталями преобразователя и объектом излучения устанавливается не мгновенно. Вследствие этого показания пирометра достигают максимального значения только через какой-то промежуток времени. Для первичных преобразователей пирометров различных типов согласно проведенным исследованиям [40] время установления показаний без учета инерционности вторичного прибора колеблется от 0,53 до 27,6 с в интервале температур визируемого тела от 1000 до 1700°C.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОКАЗАНИЙ

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОКАЗАНИЙ

8-1. Общие сведения

Из числа применяемых средств измерений для автоматизации современных промышленных установок особое место занимают измерительные преобразователи и измерительные устройства (первичные и другие приборы). Эти средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для дистанционной передачи, дальнейшего преобразования и обработки, выполняются на базе унифицированных элементов, узлов, блоков и приборов.

Одним из важных признаков современных измерительных преобразователей, первичных и других приборов ГСП по сравнению с подобными средствами измерений прежних разработок является унификация их выходных сигналов (гл. 1). Это в свою очередь позволяет унифицировать входные сигналы вторичных и регулирующих приборов. Унификация выходных и входных сигналов обеспечивает взаимозаменяемость передающих преобразователей, измерительных устройств, вторичных приборов и других устройств автоматизации и возможность резкого сокращения номенклатуры (разнообразия) вторичных приборов.

Унификация выходных и входных сигналов средств измерений и их элементов, узлов и блоков существенно повышает надежность действия дистанционной передачи, устройств защиты и обработки измерительной информации, а также открывает широкие перспективы применения средств вычислительной техники.

Ниже будут рассмотрены измерительные преобразователи, широко применяемые в измерительных устройствах и вторичных приборах, а также типовые схемы дистанционной передачи сигнала измерительной информации измерительных устройств на вторичный прибор. В этой главе рассматриваются передающие преобразователи с унифицированным выходным сигналом переменного и постоянного тока, преобразователи с унифицированным пневматическим выходным сигналом и некоторые типы промежуточных (нормирующих) преобразователей, предназначенных для преобразования выходного сигнала таких первичных преобразователей, как термоэлектрические

термометры и термометры сопротивления, в унифицированный сигнал постоянного тока.

Рассматриваемые ниже электрические аналоговые измерительные преобразователи и дистанционные передачи широко используются для централизации управления и контроля за ходом технологического процесса, режимом работы агрегатов (установок) в энергетике, а также в других отраслях промышленности. Описываемые ниже средства измерений применяют для выработки и передачи сигнала измерительной информации по линиям связи, как правило, на небольшие расстояния (0,3—0,8 км).

Измерительные преобразователи с унифицированным пневматическим сигналом широко применяют в химической, пищевой и в других отраслях промышленности, где электрические аналоговые преобразователи применять нецелесообразно.

Следует отметить, что для создания современных автоматизированных систем управления технологическими процессами в энергетике и в других отраслях промышленности наиболее перспективны преобразователи и измерительные устройства с унифицированным выходным сигналом постоянного тока. Использование постоянного тока позволяет избавиться от влияния индуктивности и емкости линии связи, повышает помехостойкость линии связи и обеспечивает их достаточную протяженность. Не менее важным фактором является также возможность использования зарекомендовавших себя вторичных приборов постоянного тока, регулирующих приборов и средств вычислительной техники с входными сигналами постоянного тока.

8-2. Реостатные измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи

Реостатные измерительные преобразователи применяют в качестве передающих, а в мостовых измерительных схемах дистанционной передачи сигналов измерительной информации также и в качестве следящих. Реостатные передающие преобразователи предназначены для преобразования угловых и линейных перемещений выходных кинематических устройств измерительных приборов в электрический сигнал, передаваемый в линию дистанционной передачи. Переменным параметром передающих реостатных преобразователей является активное сопротивление, распределенное линейно или по некоторому закону по пути движка.

Реостатные передающие преобразователи обычно изготовляют из тонкой проволоки, намотанной на каркас из пластмассы или на изолированную проволоку (по типу реохорда автоматических потенциометров). В качестве материала для проволоки применяют манганин, константан и другие металлы. За последнее время для изготовления реостатных преобразователей по типу реохорда применяют проволоку из сплава ПдВ-20 (палладий — вольфрам).

Подвижный контакт реостатного преобразователя может быть образован скользящей контактной щеткой (плоской пружиной, проволокой), скользящим пружинистым контактом (у преобразователей по типу реохорда). Надежность контакта обеспечивают применением высокого качества материала, чистотой контактных поверхностей, защитой от загрязнений, достаточным контактным давлением и стойкостью материала против истирания.

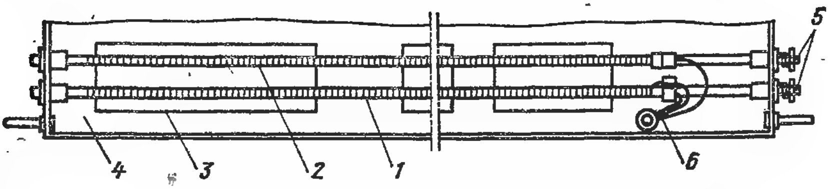


Рис. 8-2-1. Реостатный преобразователь.

1 — рабочая спираль; *2* — токоотвод; *3* — полиамидные колодки с канавками; *4* — корпус; *5* — пружины и гайки; *6* — выводные проводники.

Реостатные передающие преобразователи, устанавливаемые в одноточечных приборах типа КП1, КС1, КС2 и КС4, имеют две спирали, одна из которых является рабочей, а другая закороченная — токоотводящей. Рабочая спираль выполняется из проволоки ПдВ-20, намотанной с определенным шагом на основание из изолированной проволоки ПЭВ-2 диаметром 2 мм. Токоотводящая спираль выполняется также из проволоки ПдВ-20, намотанной на основание, но из неизолированной медной проволоки диаметром 2 мм. Рабочая и токоотводящая спирали укладываются в канавки полиамидных колодок, закрепленных в отдельном металлическом корпусе рядом с измерительным реохордом прибора. Необходимое натяжение рабочей спирали и токоотвода обеспечивается с помощью пружины и гаек. Схема устройства прямого реостатного преобразователя, устанавливаемого в приборах КСП4, КСМ4 и КСУ4, показана на рис. 8-2-1. Подвижный контакт реостатного преобразователя, выполняемый из сплава золото — серебро — медь, укреплен на одной каретке с контактом измерительного реохорда (на рис. 8-2-1 подвижные контакты не показаны). Таким образом, каждому значению измеряемой величины соответствует определенное положение подвижного контакта реостатного преобразователя.

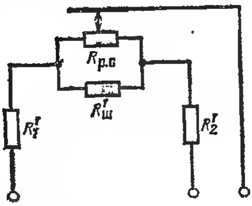


Рис. 8-2-2. Принципиальная схема реостатного преобразователя.

Для подгонки приведенного сопротивления передающего преобразователя до заданного значения $R'_{пр}$ параллельно рабочей спирали, имеющей сопротивление $R_{р.с}$, подключен шунтирующий манганиновый резистор $R'_ш$ (рис. 8-2-2). В схему реостатного преобразователя включаются резисторы R'_1 и R'_2, выполненные из манганиновой проволоки.

Приведенное сопротивление передающих реостатных преобразователей выполняется равным 90 (КС4) и 100 Ом (КП1, КС1, КС2). Пределы допускаемой основной погрешности реостатного передающего преобразователя не превышают ±0,5% нормирующего значения измеряемой величины.

Одноточечные приборы типа КВП1, КВМ1 и КВУ1 снабжаются передающими реостатными преобразователями, изготовляемыми также по типу реохорда. Рабочую и токоотводящую спирали этих преобразователей укладывают в канавки пластмассового круглого корпуса, который служит основанием измерительного реохорда. Движок подвижного контакта этого реостатного преобразователя жестко укреплен на валу, так же как и движок контакта измерительного реохорда.

Рассмотрим принципиальную схему дистанционной передачи сигнала измерительной информации с использованием реостатного передающего преобразователя и показывающего логометра ЛПр. Обозначения на схеме логометра (рис. 8-2-3) соответствуют принятым выше (§ 5-7). При среднем положении движка *Д* ($r_1 = r_2$) преобразователя *1* $R_2 = R_3$ и $R_1 + R'_л + R'_1 + r_1 = R_6 + R''_л + R'_2 + r_2$, (здесь $R'_л$ и $R''_л$ — резисторы для подгонки сопротивления проводов) потенциалы точек *a* и *b* одинаковы, а токи $I_р$ и $I'_р$ в рамках логометра *2* равны и противоположны.

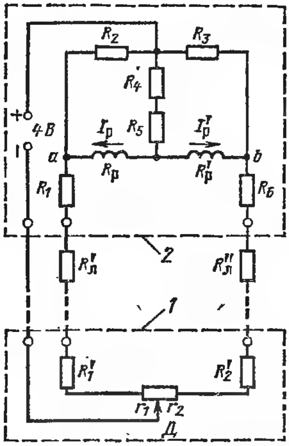


Рис. 8-2-3. Схема дистанционной передачи с использованием реостатного преобразователя и логометра.

При перемещении движка вправо ($r_1 > r_2$) потенциал точки *a* повышается, а потенциал точки *b* понижается. Соответственно ток $I_р$ уменьшается, а ток $I'_р$ увеличивается. Когда движок *Д* передвигается влево, ток $I_р$ увеличивается, а ток $I'_р$ уменьшается.

Зависимость соотношений токов в рамках логометра от изменения сопротивлений r_1 и r_2 нелинейна и шкала логометра будет неравномерной.

На рис. 8-2-4 приведена принципиальная мостовая схема дистанционной передачи измерительной информации с использованием двух реостатных преобразователей. Один из них, установленный во вторичном одноточечном приборе *1*, является передающим, а второй, установленный в дублирующем приборе *2*, выполняет функции следящего. Преобразователи с постоянными манганиновыми резисторами R'_1, R'_2, R_3 и R_4 образуют схему автоматического уравновешенного моста. Для подгонки сопротивлений соединительных проводов до заданного значения служат манганиновые резисторы $R'_л$ и $R''_л$.

При нарушении равновесия мостовой схемы вследствие перемещения движка передающего реостатного преобразователя на вход усилителя подается напряжение небаланса с вершин a и b. Этот сигнал усиливается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя *РД* дублирующего прибора. Выходной вал двигателя, кинематически связанный с движком следящего реостатного преобразователя и кареткой указателя, передвигает их до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие мостовой схемы. При достижении равновесия мостовой схемы ротор реверсивного двигателя останавливается, а движок следящего преобразователя и каретки с указательной стрелкой (или пером) занимает положение, соответствующее измеряемой величине, т. е. показанию вторичного прибора.

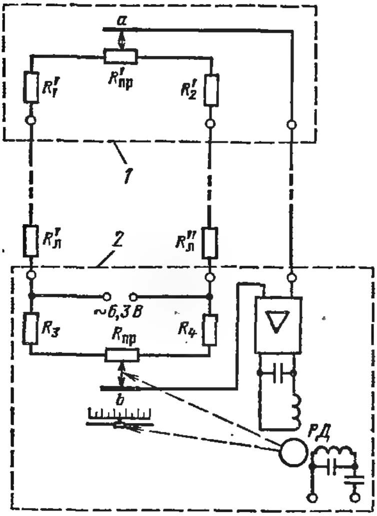


Рис. 8-2-4. Мостовая измерительная схема дистанционной передачи с использованием реостатных преобразователей.

Основным достоинством рассмотренной мостовой измерительной схемы дистанционной передачи является достаточно высокая точность и независимость показаний от изменения напряжения питания. Питание измерительной схемы может осуществляться как переменным, так и постоянным током.

8-3. Измерительные тензопреобразователи

Действие измерительных тензопреобразователей основано на изменении электрического сопротивления упругого тела при его деформации. Тензопреобразователи, выполняемые из металлической проволоки или фольги, широко применяются в научно-технической практике. Они используются в качестве передающих преобразователей в измерительных устройствах для измерения переменного во времени давления, преобразованного предварительно в деформацию. Металлические тензорезисторы широко применяются также и в качестве первичных преобразователей для измерения деформаций в деталях механизмов и машин при их исследовании.

Наряду с металлическими тензопреобразователями находят применение также и полупроводниковые тензорезисторные преобразователи. Для создания промышленных быстродействующих приборов давления, снабженных передающими преобразователями, обладающими малыми размерами и массой, наиболее перспектив-

ными являются полупроводниковые тензопреобразователи. Они обладают более высокой тензочувствительностью по сравнению с металлическими тензорезисторами и позволяют с помощью усилителя получить унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА [41—43].

По устройству металлические тензопреобразователи подразделяют на наклеиваемые и ненаклеиваемые.

Наклеиваемые тензорезисторные преобразователи, получившие широкое распространение, выполняются из уложенной зигзагообразно и приклеенной специальным клеем на полоску тонкой прочной бумаги (или пластмассы) проволоки диаметром 0,01—0,05 мм (рис. 8-3-1). К концам проволоки тензорезистора припаяны или приварены выводные проводники диаметром 0,5 и длиною 40 мм, служащие для включения тензопреобразователя в измерительную цепь.

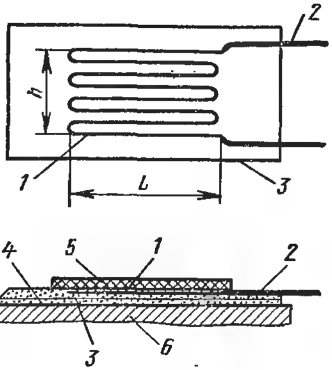


Рис. 8-3-1. Проволочный тензопреобразователь.

1 — проволока; 2 — выводные проводники; 3 — подложка из специальной бумаги или пластмассы; 4 — клей; 5 — фетр; 6 — предмет; L — база; h — ширина тензорезистора.

В качестве материала для проволоки используются обычно сплавы меди и никеля, никеля и хрома, никеля и железа и др. Основными требованиями к тензочувствительным материалам являются стабильность градуировочных характеристик, малый температурный коэффициент электрического сопротивления, по возможности большая тензочувствительность и т. п.

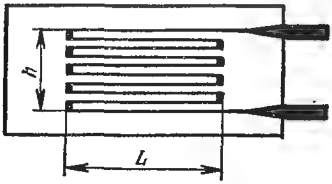


Рис. 8-3-2. Фольговый тензопреобразователь.

На рис. 8-3-2 показано схематично устройство фольгового тензопреобразователя. Эти тензопреобразователи выполняют из металлической (константановой, хромоникелевой и др.) фольги толщиной 0,001—0,01 мм вытравлением соответствующих частей, вследствие чего получается решетка требуемой формы. Такой способ дает возможность изготовлять тензорезисторы различных форм.

Полупроводниковые тензопреобразователи изготовляют с тензорезисторами из полупроводников круглого или плоского сечения.

Для измерения относительного удлинения во многих направлениях применяют тензопреобразователи, имеющие три или четыре проволочных тензорезистора, соответствующим образом ориентированные и наклеенные на одну общую подложку. Тензорезисторы могут быть наклеены рядом друг с другом или друг на друга [44].

Металлический тензорезисторный передающий преобразователь механически соединяют, например, с манометрической пружиной или плоской мембраной, которая деформируется под действием измеряемого давления. При деформации меняются размеры и удельное электрическое сопротивление проволоки тензопреобразователя. Размер деформации определяет изменение электрического сопротивления тензорезистора, измеряемого обычно с помощью мостовой измерительной схемы.

Активное сопротивление R проволочного проводника

$$R=\rho\frac{l}{F}, \tag{8-3-1}$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление проволоки, Ом·м; l — длина проволоки, м; F — площадь поперечного сечения проволоки, м^2.

При деформации (изменения осевого напряжения) проволоки изменяются ее длина, сечение, удельное электрическое сопротивление и результирующее относительное изменение ее активного сопротивления равно

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta l}{l}+\frac{\Delta\rho}{\rho}-\frac{\Delta F}{F}.$$

Выражая в этом уравнении относительное изменение площади поперечного сечения проволоки через продольное изменение с помощью коэффициента Пуассона μ

$$\frac{\Delta F}{F}=-2\mu\frac{\Delta l}{l},$$

получаем:

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta l}{l}+\frac{\Delta\rho}{\rho}+2\mu\frac{\Delta l}{l}. \tag{8-3-2}$$

Разделив уравнение (8-3-2) на $\Delta l/l$, получим уравнение, определяющее коэффициент деформации (тензочувствительность) прямой проволоки:

$$S=1+2\mu+\frac{\Delta\rho l}{\Delta l\rho}. \tag{8-3-3}$$

Для металлов, из которых изготовляют проволочные тензопреобразователи, коэффициент Пуассона в области упругих деформаций лежит в пределах от 0,25 до 0,5.

Проволочный тензопреобразователь обычно наклеивают на исследуемую деталь или упругий чувствительный элемент манометра таким образом, чтобы его ось совпадала с направлением наибольшего напряжения. При одноосном напряжении, кроме деформации в направлении напряжения, возникает поперечная деформация. Вследствие деформации частей, которые не находятся в направлении напряжения, по изменению удельного электрического сопротивления и известной тензочувствительности s проволоки точно

определить значение относительного удлинения нельзя. Нельзя также тензочувствительность тензопреобразователя приравнять тензочувствительности s прямой проволоки. Влияющим фактором является также и неравномерность распределения напряжения при сдвиге, посредством которого передается деформация детали или упругого чувствительного элемента на проволоку тензопреобразователя.

Влияние поперечной деформации на тензочувствительность преобразователя $s_п$ уменьшается с уменьшением ширины h тензопреобразователя и с увеличением сечения поперечных проводников между продольными проволоками (см. рис. 8-3-1).

Значение тензочувствительности $s_п$ проволочного тензопреобразователя при одинаковом числе витков зависит от размера его базы L (если $L < 15$ мм). При $L \geqslant 15$ мм тензочувствительность $s_п$ практически не меняется с увеличением базы.

Тензочувствительность $s_п$ тензопреобразователей обычно определяют при заданном значении тока путем их индивидуальной градуировки. В большинстве случаев значение сопротивления тензопреобразователя лежит в пределах 80—600 Ом при 20°С. Изменение сопротивления тензопреобразователя в зависимости от удлинения обычно определяют с погрешностью 1—2%.

Относительное изменение сопротивления металлических тензопреобразователей не превышает 1% даже при наибольших размерах удлинения проволок, и для уменьшения температурной погрешности необходимо, чтобы материал проволоки (фольги) тензопреобразователя имел возможно меньший температурный коэффициент электрического сопротивления. При минимальном значении температурного коэффициента сопротивления материала проволоки и осуществлении дополнительных мер температурную погрешность можно свести практически к нулю.

8-4. Дифференциально-трансформаторные преобразователи и схемы дистанционной передачи

Дифференциально-трансформаторные преобразователи предназначены для преобразования линейного перемещения сердечника в выходной электрический параметр (сигнал). Переменным параметром у преобразователей этого типа является значение взаимной индуктивности между обмотками. Дифференциально-трансформаторные преобразователи широко применяются в первичных приборах (манометрах, дифманометрах и др.), рассматриваемых ниже, в качестве передающих и во вторичных приборах — в качестве компенсирующих.

Электрическая схема дифференциально-трансформаторного преобразователя ДТП приведена на рис. 8-4-1. Преобразователь состоит из двух секций первичной обмотки *3*, намотанных согласно, двух секций *1* и *2* вторичной (выходной) обмотки, включенных встречно, и подвижного сердечника *4*. Сердечник передающего

преобразователя соединен с чувствительным элементом первичного прибора (рис. 10-5-1, 12-5-1 и др.), а сердечник компенсирующего преобразователя, устанавливаемого во вторичном приборе, кинематически связан через рычаг и профилированный кулачок с валом реверсивного асинхронного двигателя.

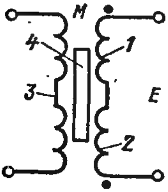


Рис. 8-4-1. Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Создаваемый первичной обмоткой преобразователя магнитный поток индуктирует в секциях выходной обмотки э. д. с. e_1 и e_2, значения которых зависят от тока питания обмотки I, частоты тока и взаимных индуктивностей M_1 и M_2 между секциями *1* и *2* и первичной обмоткой. Взаимные индуктивности M_1 и M_2 равны между собой при среднем (нейтральном) положении сердечника внутри катушки преобразователя[1]. При перемещении сердечника вверх из среднего положения значение взаимной индуктивности M_1 увеличивается, а M_2 уменьшается. Если сердечник из среднего положения перемещается вниз, то M_1 уменьшается, а M_2 увеличивается.

Так как секции *1* и *2* включены встречно, то взаимная индуктивность $M = M_1 - M_2$ между выходной обмоткой и первичной обмоткой в зависимости от положения сердечников определяется выражением

$$M = M_{\text{н}} \frac{x}{x_{\text{н}}} e^{-j\varphi}, \qquad (8\text{-}4\text{-}1)$$

где $M_{\text{н}}$ — номинальное (максимальное) значение модуля взаимной индуктивности, соответствующее полному (номинальному) рабочему ходу сердечника из среднего положения $x_{\text{н}}$; x — перемещение сердечника от нейтрали; φ — аргумент вектора взаимной индуктивности.

Зависимость между значением взаимной индуктивности M и относительным перемещением сердечника $x/x_{\text{н}}$ для неунифицированного дифференциально-трансформаторного преобразователя приведена на рис. 8-4-2.

Значение выходной э. д. с. E дифференциально-трансформаторного преобразователя равно

$$\dot{E} = -j\omega \dot{I} M = -j\omega \dot{I} M_{\text{н}} \frac{x}{x_{\text{н}}} e^{-j\varphi}, \qquad (8\text{-}4\text{-}2)$$

где I — ток питания первичной обмотки преобразователя, А; $\omega = 2\pi f$, здесь f — частота тока питания, Гц.

Значение и фаза выходного сигнала E зависят от положения сердечника в катушке преобразователя по отношению к нейтрали (рис. 8-4-1).

[1] Ниже при рассмотрении дифференциально-трансформаторного преобразователя не учитывается остаточная взаимная индуктивность, зависящая от допусков, принятых при изготовлении преобразователей.

На рис. 8-4-3 показана принципиальная схема дистанционной передачи сигнала измерительной информации первичного прибора на вторичный прибор с помощью неунифицированных дифференциально-трансформаторных преобразователей. На рис. 8-4-3 приняты следующие обозначения: *ПП-1* — первичный прибор; *ДТП* — передающий преобразователь первичного прибора; *ВП* — вторичный прибор; *ДТП-2* — компенсирующий преобразователь вторичного прибора; *У* — усилитель; *РД* — реверсивный двигатель, выходной вал которого через профилированный кулачок и рычаг соединен с сердечником компенсирующего преобразователя; *К* — каретка с указателем, кинематически связанная с выходным валом реверсивного двигателя; *КО* — корректор «нуля» — катушка с регулируемым сердечником, которая состоит из первичной обмотки и двух секций вторичной, включенных встречно; *КИ* — кнопка контроля исправности вторичного прибора.

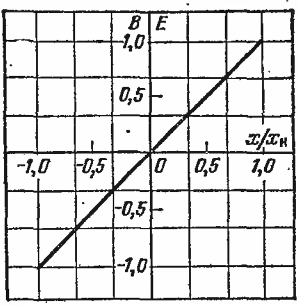


Рис. 8-4-2. Характеристика неунифицированного преобразователя ДТП.

Первичные обмотки дифференциально-трансформаторных преобразователей и катушка корректора «нуля» соединены последовательно и питаются переменным током напряжением 33 В, частотой 50 Гц от специальной обмотки силового трансформатора усилителя. Вторичные обмотки преобразователей соединены по компенсационной схеме.

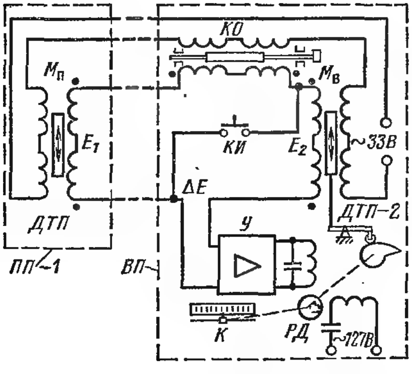


Рис. 8-4-3. Измерительная схема дистанционной передачи сигнала измерительной информации с использованием неунифицированных преобразователей ДТП.

При рассмотрении действия измерительной схемы будем полагать, что сердечник в катушке корректора «нуля» находится в среднем положении.

При рассогласованных положениях сердечников передающего и компенсирующего преобразователей выходная э. д. с. E_1 и компенсирующая E_2 не равны между собой и на вход усилителя поступает сигнал небаланса $\Delta E = E_1 - E_2$, значение и фаза которого зависят от значения и направления рассогласования сердечников. Сигнал небаланса ΔE усиливается и приводит в действие реверсивный двигатель, выходной вал которого с помощью кинематической связи перемещает сердечник преобразователя *ДТП-2* до тех пор, пока

сигнал небаланса ΔE, уменьшаясь, не станет меньше порога чувствительности усилителя. При достижении баланса измерительной схемы ротор реверсивного двигателя остановится, а сердечник компенсирующего преобразователя и каретка займут положение, соответствующее определенному ходу сердечника преобразователя ДТП первичного прибора, а следовательно, и измеряемой величине. В этом случае $E_1 = E_2$ и $M_п = M_в$.

Дифференциально-трансформаторный преобразователь является параметрическим преобразователем, в котором перемещение сердечника преобразовывается в параметр — взаимную индуктивность между первичной и вторичной обмотками. Неравенство взаимных индуктивностей $M_п$ и $M_в$ обусловливает возникновение в измерительной схеме (рис. 8-4-3) сигнала небаланса.

В схеме вторичного прибора предусмотрено дополнительное устройство *КО*, позволяющее в случае необходимости производить корректировку нуля измерительного комплекта. Смещение нуля может происходить за счет перегрузки первичного прибора, его переноски и т. д. Корректировку нуля производят с помощью сердечника катушки *КО*, вращая его до тех пор, пока стрелка вторичного прибора не установится против нулевой отметки шкалы с нормированной погрешностью.

Для проверки исправности вторичного прибора предусмотрена перемычка с кнопкой *КИ* («контроль»). При нажатии кнопки закорачиваются выходная цепь передающего преобразователя ДТП и вторичная обмотка катушки *КО*. Если прибор исправен, то стрелка его должна установиться против контрольной отметки на циферблате.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи с характеристикой, приведенной на рис. 8-4-2, используются в показывающих вторичных автоматических приборах типа ДП с вращающимся цилиндрическим циферблатом типа ЭИВ, в показывающих и самопишущих миниатюрных типа ДСМ, малогабаритных типа ДС; в показывающих и самопишущих типа ЭПИД.

Если вторичный прибор из числа указанных типов в комплекте с дифманометром предназначен для измерения расхода жидкости, газа или пара по перепаду давления в сужающем устройстве, то он снабжается квадратичным кулачком, так как между расходом и перепадом давления существует квадратичная зависимость (гл. 14). Во всех других случаях вторичные приборы имеют линейный кулачок.

Рассмотренные дифференциально-трансформаторные преобразователи невзаимозаменяемы и измерительные комплекты, состоящие из первичных приборов с такими преобразователями и указанных выше вторичных приборов, требуют индивидуальной градуировки.

Рассмотрим унифицированные взаимозаменяемые дифференциально-трансформаторные преобразователи, разработанные и освоенные московским приборостроительным заводом «Манометр». Унификация выполнена на базе проведенных на заводе «Манометр» под

руководством Ю. Я. Вострикова исследований дистанционной дифференциально-трансформаторной измерительной системы [45, 46].

На рис. 8-4-4 показано устройство взаимозаменяемого дифференциально-трансформаторного передающего преобразователя ДТП и его электрическая схема. Катушка преобразователя, выполненная на каркасе из пресспорошка, имеет две секции первичной обмотки *3*, намотанные согласно, и две секции *1* и *2* вторичной (выходной) обмотки, намотанные встречно без разрыва провода. К выходной обмотке подключен делитель, состоящий из регулируемого резистора R_1 и постоянного резистора R_2. Внутри канала катушки преобразователя находится подвижный сердечник *4* из стали (марок Э8, Э10, Э12), соединяемый с чувствительным элементом первичного прибора. Для защиты сердечника от коррозии он заключен в оболочку из нержавеющей немагнитной стали (36НХТЮ). В катушке преобразователя сердечник внутри защитной оболочки показан пунктиром. Сердечник из среднего нейтрального положения может перемещаться вверх или вниз на нормированное расстояние.

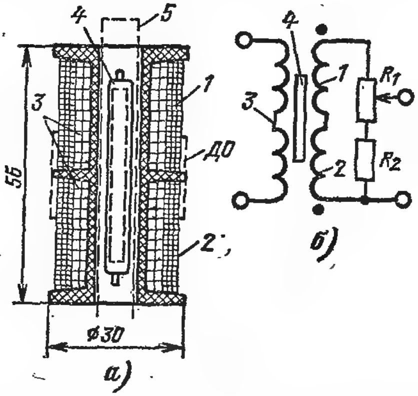


Рис. 8-4-4. Устройство (*а*) и электрическая схема (*б*) взаимозаменяемого передающего преобразователя ДТП.

Катушка передающего преобразователя ДТП закрыта экраном, прикрепляемым к фланцу каркаса (на рис. 8-4-4, *а* экран и фланец не показаны). Передающие преобразователи ДТП могут применяться с разделительной немагнитной трубкой *5* (на рис. 8-4-4, *а* показана пунктиром) и без нее. Выбор того или иного варианта зависит от типа первичного прибора.

Взаимозаменяемые дифференциально-трансформаторные передающие преобразователи имеют модификации ДТП-1, ДТП-2 и ДТП-3 с номинальным рабочим ходом сердечника из среднего положения 1,6; 2,5 и 4 мм соответственно. Допускаемые отклонения рабочего хода сердечника для этих преобразователей не превышают ±25% номинального значения.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи модификации ДТП-4 с номинальным рабочим ходом сердечника 4 мм, устанавливаемые во вторичных приборах, устроены аналогично с передающими и снабжены дополнительной третьей обмоткой *ДО* с подключенным к ней регулируемым резистором R_3 для корректировки нуля измерительного комплекта по шкале вторичного прибора. Дополнительная обмотка *ДО* из двух секций размещается возле средней щеки каркаса катушки (на рис. 8-4-4, *а* обмотка *ДО* показана пунктиром). Секции этой обмотки наматываются проводом ПЭВ-2-0,2 поверх вторичной обмотки.

Электрическая схема дифференциально-трансформаторного преобразователя ДТП-4 с подключенным к нему корректором нуля *КО*, состоящим из обмотки *ДО* и регулируемого резистора R_3, показана на рис. 8-4-5. К выходной обмотке преобразователя подключен делитель, состоящий из регулируемого резистора R'_1 и постоянного резистора R'_2.

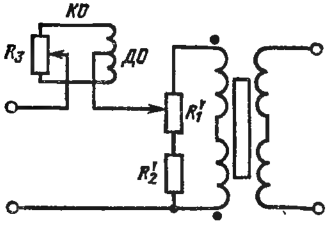


Рис. 8-4-5. Схема взаимозаменяемого компенсирующего преобразователя ДТП-4.

Обмотки и сопротивления резисторов делителя передающих (ДТП-1, ДТП-2, ДТП-3) и компенсационного (ДТП-4) преобразователей выбраны так, что их характеристики при токе питания 125 мА и частоте 50 Гц (напряжение 12 В) одинаковы. Номинальное значение взаимной индуктивности между выходной цепью и первичной обмоткой для всех модификаций взаимозаменяемых преобразователей ДТП принято равным 10 мГ. Значение взаимной индуктивности M между выходной цепью и первичной обмоткой для этих преобразователей определяется выражением

$$M = \frac{\dot{U}}{j\omega \dot{I}} = M_н \frac{x}{x_н} e^{-j\varepsilon}; \qquad (8\text{-}4\text{-}3)$$

из (8-4-3) выходное напряжение преобразователя

$$\dot{U} = j\omega \dot{I} M_н \frac{x}{x_н} e^{-j\varepsilon}, \qquad (8\text{-}4\text{-}4)$$

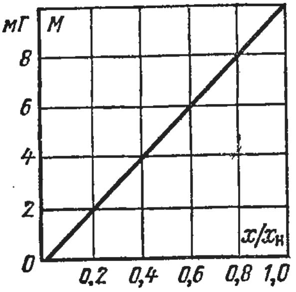


Рис. 8-4-6. Характеристика взаимозаменяемых преобразователей ДТП.

где $M_н$ — номинальное значение взаимной индуктивности ($M_н = 0{,}01$ Г), соответствующее номинальному рабочему ходу сердечника $x_н$; x — перемещение сердечника от нейтрали; ε — номинальное значение угла потерь (угол сдвига фазы сигнала напряжения переменного тока по отношению к фазе тока питания, сдвинутой на 90°), $\varepsilon = 0{,}1222$ рад или 7°.

При градуировке (поверке) первичного и вторичного приборов верхний предел выходного напряжения, а следовательно, и взаимной индуктивности преобразователей ДТП можно изменять (передающего на ±25%, компенсационного на ±15%) с помощью регулируемых резисторов R_1 и R'_1 делителей.

Зависимость между значением взаимной индуктивности M и относительным перемещением сердечника $x/x_н$ взаимозаменяемого дифференциально-трансформаторного преобразователя приведена на рис. 8-4-6. Нелинейность зависимости $M = f(x/x_н)$ преобразователя ДТП не превышает 0,5% номинального значения взаимной индуктивности.

Предел допускаемой основной погрешности преобразователя не должен превышать 1% номинального значения взаимной индуктивности. Относительное значение остаточной взаимной индуктивности преобразователя ДТП не должно превышать ±1% нормированного значения взаимной индуктивности.

Рассмотрим принципиальную схему дистанционной передачи сигнала измерительной информации первичного прибора на вторичный прибор с помощью унифицированных дифференциально-транс-

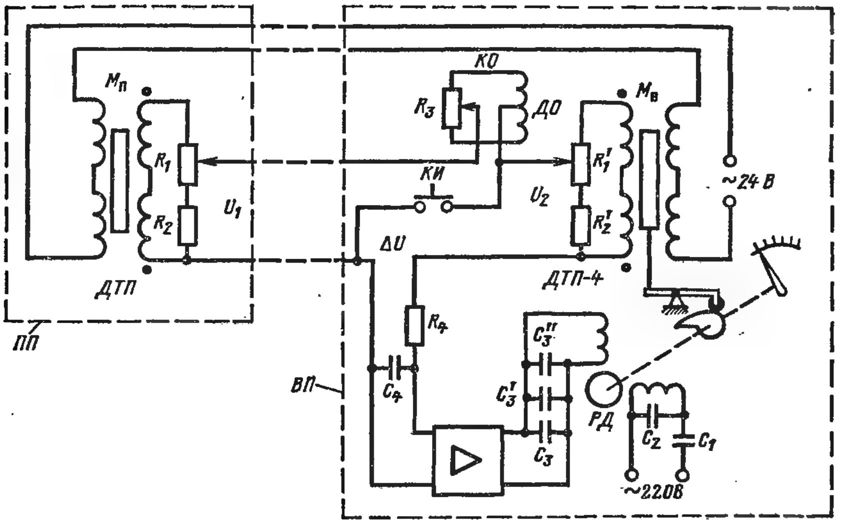


Рис. 8-4-7. Принципиальная измерительная схема дистанционной передачи сигнала измерительной информации с использованием взаимозаменяемых преобразователей ДТП.

форматорных преобразователей, показанную на рис. 8-4-7. На схеме приняты следующие обозначения: *ПП* — первичный прибор; *ДТП* — передающий преобразователь первичного прибора; *ВП* — вторичный прибор; *ДТП-4* — компенсационный преобразователь вторичного прибора; *КО* — корректор нуля, состоящий из обмотки *ДО* и регулируемого резистора R_3; *КИ* — кнопка контроля исправности вторичного прибора; *РД* — реверсивный двигатель, выходной вал которого кинематически соединен с профилированным кулачком (линейным или квадратичным) и рычагом, соединенным с сердечником компенсирующего преобразователя; R_4C_4 — фазосдвигающая цепочка, служащая для согласования фаз напряжения небаланса измерительной схемы с напряжением сети и для уменьшения погрешности за счет остаточного напряжения $U_{ост}$. Остальные обозначения соответствуют принятым выше.

Первичные обмотки передающего ДТП и компенсирующего ДТП-4 преобразователей соединены последовательно и питаются

переменным током напряжением 24 В, частотой 50 Гц от специальной обмотки силового трансформатора усилителя. Вторичные обмотки преобразователей соединены по компенсационной схеме.

Принцип действия измерительной схемы ничем не отличается от рассмотренного выше.

Линия связи между первичным и вторичным приборами, имеющая сопротивление каждой жилы не более 5 Ом и емкость между каждой парой жил не более 0,02 мкФ, не вносит дополнительной погрешности. Для рекомендуемых заводом-изготовителем приборов к применению типов кабелей это соответствует длине линии примерно 250 м. Увеличение длины линии связи вызывает изменение выходного сигнала не более 0,1% на каждые последующие 100 м. Корректировку нуля производят с помощью движка регулируемого резистора R_3. Для поверки исправности вторичного прибора кнопкой *КИ* закорачивают выходную цепь преобразователя первичного прибора и цепь корректора нуля. Если прибор исправен, то стрелка его должна установиться на начальную отметку шкалы.

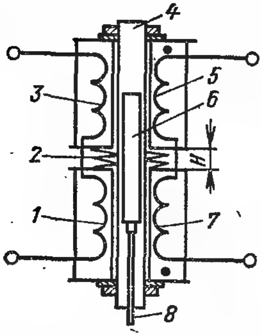


Рис. 8-4-8. Схема устройства взаимозаменяемого передающего преобразователя типа ПД.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи ДТП-4 используются во взаимозаменяемых вторичных приборах показывающих и самопишущих с ленточной диаграммной бумагой шириной 160 мм типа КСД2, в показывающих типа КПД1, КВД1 и в других приборах типа КСД, изготовляемых с линейным или квадратичным кулачком. Вторичные приборы указанных типов выпускаются также с пределами изменения взаимной индуктивности между выходной цепью и первичной обмоткой преобразователя, равными 10—0—10мГ.

Кроме рассмотренных выше взаимозаменяемых дифференциально-трансформаторных преобразователей изготовляются также унифицированные передающие преобразователи других типов.

Схема устройства дифференциально-трансформаторного передающего преобразователя типа ПД Харьковского завода КИП показана на рис. 8-4-8. Передающий преобразователь состоит из двух раздельных катушек, закрепленных на немагнитной разделительной трубке *4* с некоторым зазором *H*. На этих катушках размещены две секции *1* и *3* первичной обмотки, включенные согласно, и две секции *5* и *7* вторичной (выходной) обмотки, включенные встречно. В зазоре *H* между катушками находится пружина *2*, которая обеспечивает определенное фиксированное их положение. Внутри немагнитной трубки имеется подвижный сердечник *6*, который с помощью немагнитного штока *8* соединяется с чувствительным элементом первичного прибора. Сердечник из среднего (нейтрального) положения может перемещаться вверх и вниз на нормированное

расстояние. Катушки преобразователя ПД снабжены экранами (на рис. 8-4-8 не показаны).

Передающие преобразователи типа ПД изготовляют в трех модификациях: ПД3, ПД4 и ПД5 с номинальным рабочим ходом сердечника из среднего положения ±1,5; ±2 и ±2,5 мм соответственно. Параметры обмоток катушек этих преобразователей выбраны так, что их характеристики при токе питания 320 мА, 50 Гц (напряжение 12 В) одинаковы. Пределы изменения модуля взаимной индуктивности $M_н$ между первичной и вторичной обмотками преобразователей ПД в диапазоне рабочего хода сердечника равны —10÷0÷+10 мГ. При принятых значениях $M_н$ для этих преобразователей пределы изменения выходной э. д. с. в диапазоне рабочего хода сердечника равны 1—0—1 В.

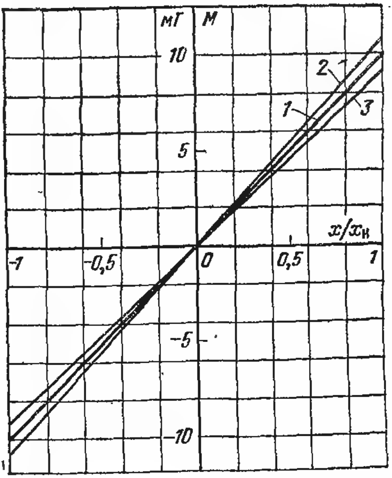


Рис. 8-4-9. Характеристика взаимозаменяемого передающего преобразователя типа ПД.

Для преобразователей типа ПД зависимость взаимной индуктивности между первичной и вторичной обмотками и значения выходной э. д. с. E от положения сердечника определяются уравнениями вида (8-4-1) и (8-4-2).

На рис. 8-4-9 показаны зависимости между значением взаимной индуктивности M и относительным перемещением сердечника $x/x_н$. Нелинейность зависимости $M = f(x/x_н)$ преобразователей ПД в пределах рабочего хода сердечника не превышает 0,5% номинального значения модуля взаимной индуктивности. При градуировке взаимозаменяемых первичных приборов значение $M_н$ передающего преобразователя ПД можно изменять, воздействуя на зазор H между катушками. На рис. 8-4-9 характеристика *1* соответствует некоторому среднему зазору H между катушками, характеристика *2*—зазору H меньше среднего, а *3*—зазору H больше среднего.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи типа ПД используются только в первичных приборах, например в мембранных дифманометрах (гл. 12), ротаметрах и т. п.

Первичные приборы с передающими преобразователями типа ПД комплектуются с взаимозаменяемыми вторичными приборами типов ВФС и ВФП, снабженными ферродинамическими преобразователями типа ПФ2 (§ 8-5).

8-5. Ферродинамические преобразователи и схемы дистанционной передачи

Ферродинамические преобразователи применяются для преобразования в измерительных устройствах угловых перемещений в унифицированный выходной электрический сигнал переменного тока. Преобразователи этого типа, разработанные СКБ САУ под руководством К. И. Диденко и изготовляемые Харьковским заводом КИП, используются в измерительных устройствах (первичных приборах, вторичных приборах и более сложных средствах измерений) в качестве передающих, компенсирующих или решающих элементов [17].

Взаимозаменяемый ферродинамический преобразователь типа ПФ (рис. 8-5-1) содержит магнитопровод *1*, у которого вверху во внутреннем контуре сделана радиальная выточка; катушку *2*, в которой размещены обмотка возбуждения, питаемая переменным током с частотой 50 Гц, и обмотка смещения, намотанная поверх обмотки возбуждения; башмак *3* с радиальной выточкой; сердечник *4* для создания радиального магнитного поля в кольцевом зазоре *5*; рамку *6*, ось которой кинематически соединяется с выходной осью преобразователя; плунжер *8* для регулировки зазора *7*, изменяющий градуировочную характеристику преобразователя.

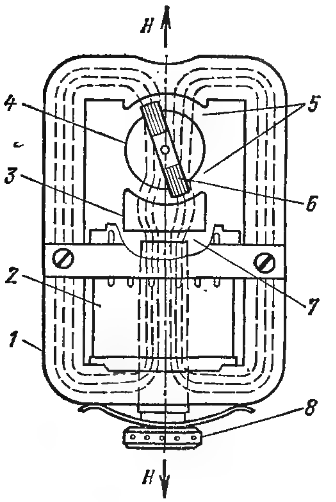


Рис. 8-5-1. Схема устройства взаимозаменяемого преобразователя типа ПФ.

На рис. 8-5-2 показана кинематическая схема присоединения оси рамки преобразователя ПФ к выходной оси его и к внешней кинематической цепи, например, первичного прибора, угловое перемещение которой необходимо преобразовать в электрический сигнал переменного тока. На оси рамки *11* закреплена шестерня *10*, которая сцеплена с сектором *9*, сидящим на выходной оси *3* преобразователя. Токовыводящие спиральные пружины рамки, которые на схеме не показаны, одновременно служат для выбора люфта в этой паре. Сектор *9* снабжен специальным эксцентриковым устройством с винтом *12*, с помощью которого можно поворачивать сектор на небольшой угол относительно выходной оси *3*. При этом шестерня и рамка также будут поворачиваться на некоторый угол. Сектор, повернутый винтом эксцентрика, удерживается в установленном положении с помощью двух плоских пружин *8*. Эксцентриковым устройством пользуются при наладке преобразователей для получения необходимых их характеристик. К выходной оси преобразователя крепится сектор *2*, соединяющий ее с внешней осью *1* первичного прибора. Для выбора люфта в этой кинематической цепи служит цилиндрическая пружина *6*. Один конец этой пружины крепится к стойке *5*, укрепленной на плите *4*, а другой — к втулке *7*, сидящей на выходной оси преобразователя.

Преобразователь закрыт стальной крышкой, которая является экраном. В этой крышке сделаны отверстия, нормально закрытые щитками, для доступа к винту эксцентрика *12* и плунжеру *8* (рис. 8-5-1). Наладку преобразователей необходимо производить только с надетой и закрепленной крышкой.

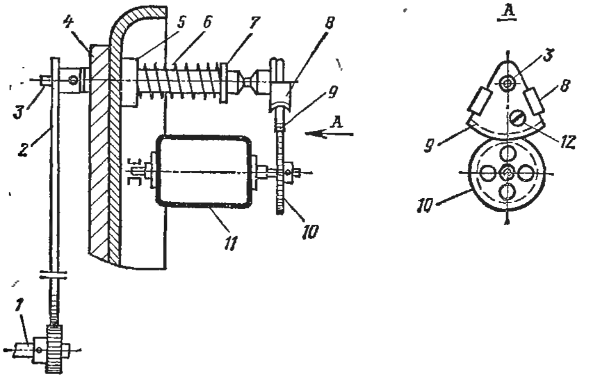


Рис. 8-5-2. Кинематическая схема соединения оси рамки с выходной осью преобразователя типа ПФ.

На рис. 8-5-3 показаны принципиальные электрические схемы ферродинамического преобразователя типа ПФ без обмотки смещения (*а*) и с обмоткой смещения (*б*).

Магнитопровод преобразователя типа ПФ в отличие от ранее выпускаемых преобразователей ПФ замкнут по внешнему контуру. Такое выполнение магнитопровода привело к уменьшению потоков рассеяния, а вместе с тем позволило обеспечить взаимозаменяемость рассматриваемых преобразователей и приборов, в которых они применяются.

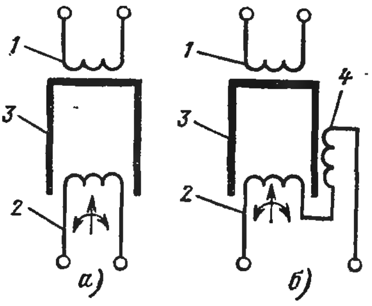


Рис. 8-5-3. Принципиальная электрическая схема преобразователя типа ПФ без обмотки смещения (*а*) и с обмоткой смещения (*б*).

1 — обмотка возбуждения; *2* — рамка; *3* — магнитопровод; *4* — обмотка смещения.

Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения преобразователя, индуктирует э. д. с. в рамке и в обмотке смещения. В дальнейшем эту э. д. с. мы будем называть выходной э. д. с. или выходным сигналом преобразователя.

Индуктируемая э. д. с. в рамке зависит от тока питания обмотки возбуждения и взаимной индуктивности $M_р$ между рамкой и обмоткой возбуждения. Взаимная индуктивность $M_р$ изменяется при повороте рамки от нуля (при совпадении плоскости рамки с магнитной нейтралью *НН*) до максимального значения (при повороте рамки от магнитной нейтрали *НН* на угол $\alpha_{20} = \pm 20°$). Взаимная индук-

тивность $M_р$ в зависимости от угла поворота рамки определяется выражением

$$M_р = M_н \frac{\alpha}{\alpha_{20}} e^{-j\varphi}, \qquad (8\text{-}5\text{-}1)$$

где $M_н$ — номинальное значение модуля взаимной индуктивности, соответствующее максимальному углу поворота рамки (α_{20}) от магнитной нейтрали $НН$ (рис. 8-5-1); α — угол отклонения рамки от магнитной нейтрали; φ — аргумент взаимной индуктивности.

Значение индуктируемой э. д. с. в обмотке смещения пропорционально току питания обмотки возбуждения преобразователя и взаимной индуктивности $M_с$ между обмоткой смещения и обмоткой возбуждения. Значение взаимной индуктивности $M_с$ определяется уравнением

$$M_с = kM_н e^{-j\varphi}, \qquad (8\text{-}5\text{-}2)$$

где k — коэффициент, значение которого зависит от модификации преобразователя ПФ.

Обмотка смещения и рамка преобразователя обычно соединяются последовательно (рис. 8-5-3, *б*). В этом случае взаимная индуктивность M между обмоткой возбуждения и выходной цепью преобразователя, образованной рамкой и обмоткой смещения, равна:

$$M = M_р + M_с = M_н \left(k + \frac{\alpha}{\alpha_{20}}\right) e^{-j\varphi}. \qquad (8\text{-}5\text{-}3)$$

Преобразователи модификаций ПФ-1 и ПФ-2 не имеют обмотки смещения (рис. 8-5-3, *а*). В этом случае коэффициент $k = 0$ и уравнение (8-5-3) принимает вид:

$$M = M_р = M_н \frac{\alpha}{\alpha_{20}} e^{-j\varphi}. \qquad (8\text{-}5\text{-}4)$$

Преобразователи модификаций ПФ-3, ПФ-4 и ПФ-5, ПФ-6 имеют обмотки смещения (рис. 8-5-3, *б*), и для них коэффициент k соответственно равен 1 и 2.

Значение выходной э. д. с. E преобразователя ПФ без обмотки смещения определяется выражением

$$\dot{E} = -j\omega \dot{I} M_р = -j\omega \dot{I} M_н \frac{\alpha}{\alpha_{20}} e^{-j\varphi}, \qquad (8\text{-}5\text{-}5)$$

а с обмоткой смещения

$$\dot{E} = -j\omega \dot{I} M = -j\omega \dot{I} M_н \left(k + \frac{\alpha}{\alpha_{20}}\right) e^{-j\varphi}. \qquad (8\text{-}5\text{-}6)$$

Из приведенных выражений видно, что значение выходного сигнала преобразователя изменяется пропорционально взаимной индуктивности. На рис. 8-5-4 приведены графики, характеризующие изменение выходной э. д. с. E преобразователей указанных выше модификаций в зависимости от угла поворота рамки α от магнитной нейтрали при различной ширине зазора 7 (рис. 8-5-1).

Изменение значения взаимной индуктивности M, а следовательно, и выходной э. д. с. E (рис. 8-5-4) взаимозаменяемых преобразователей ПФ в пределах $I'—I—I''$, $II'—II—II''$ и $III'—III—III''$ можно осуществлять изменением ширины зазора *7* (рис. 8-5-1) как при питании преобразователя от источника стабилизированного тока, так и от источника напряжения с последовательно включенным сопротивлением, равным полному сопротивлению обмотки (обмоток) возбуждения преобразователя соответствующей модификации. При повороте плунжера *8* (рис. 8-5-1) на пол-оборота в одну или в другую сторону от среднего положения относительное изменение взаимной индуктивности, а следовательно, и э. д. с. составляет ±10%.

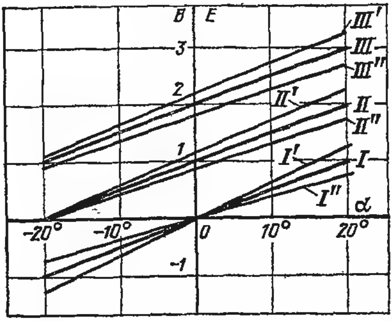


Рис. 8-5-4. Зависимость $E = f(\alpha)$ взаимозаменяемых преобразователей ПФ.

В преобразователях ПФ, как отмечалось выше, имеется второе регулировочное устройство, которое обеспечивает возможность параллельного смещения характеристики путем поворота рамки в зазоре *5* (рис. 8-5-1) в пределах 12° с помощью винта эксцентрика и сектора (рис. 8-5-2) при неизменном положении входной оси преобразователя.

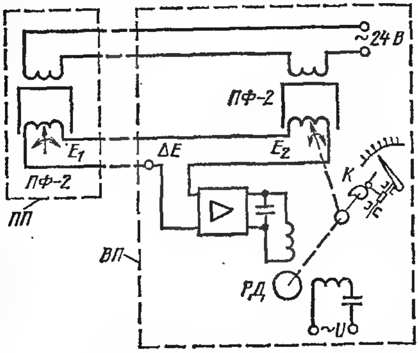


Рис. 8-5-5. Принципиальная схема дистанционной передачи с использованием преобразователей ПФ-2.

Если при применении преобразователя ПФ необходимо снимать часть его выходного сигнала, то применяют делитель, сопротивление которого должно быть не менее 1500 Ом.

Основные электрические параметры взаимозаменяемых преобразователей ПФ приведены в табл. 8-5-1.

Для всех преобразователей ПФ аргумент взаимной индуктивности принят равным 84,5 ±1°. Нелинейность зависимости выходного сигнала преобразователя от угла поворота его рамки не превышает ±0,4%. Нелинейность зависимости выходного сигнала от тока возбуждения (при его изменении в пределах ±10% номинального значения) не превышает ±0,5%.

На рис. 8-5-5 показана принципиальная схема дистанционной передачи сигнала измерительной информации первичного прибора *ПП* на вторичный прибор *ВП* с использованием ферродинамических

Таблица 8-5-1

Основные электрические параметры взаимозаменяемых преобразователей ПФ

Шифр модификации	Напряжение питания, В (50 Гц)	Номинальное значение тока питания, мА	Пределы изменения модуля взаимной индуктивности, мГ	Модуль комплексного сопротивления обмотки возбуждения, Ом	Пределы изменения выходного сигнала при номинальном токе питания, В
ПФ-1	60	64	$-50\div0\div+50$	940±50	$-1\div0\div+1$
ПФ-2	12	320	$-10\div0\div+10$	37,5±2	$-1\div0\div+1$
ПФ-3	60	64	0—100	940±50	0—2
ПФ-4	12	320	0—20	37,5±2	0—2
ПФ-5	60	64	50—150	940±50	1—3
ПФ-6	12	320	10—30	37,5±2	1—3

преобразователей ПФ-2. Обмотки возбуждения передающего преобразователя первичного прибора и компенсирующего преобразователя вторичного прибора соединены последовательно и питаются переменным током напряжением 24 В, 50 Гц. Обмотки рамок преобразователей соединены по компенсационной схеме.

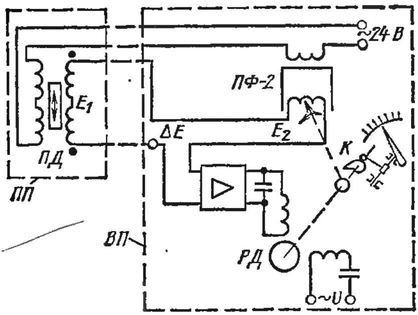


Рис. 8-5-6. Принципиальная схема дистанционной передачи с использованием преобразователей ПД и ПФ-2.

При рассогласованном положении рамок преобразователей на вход усилителя будет подаваться разность э. д. с. $\Delta E = E_1 - E_2$. Сигнал небаланса ΔE усиливается усилителем и приводит в действие реверсивный двигатель *РД*, выходной вал которого, кинематически соединенный с рамкой компенсирующего преобразователя и через профилированный кулачок *К* (линейный или квадратичный) со стрелкой, перемещает их до тех пор, пока э. д. с. небаланса ΔE, уменьшаясь, не станет меньше порога чувствительности усилителя. При достижении полной компенсации ротор реверсивного двигателя остановится, а рамка преобразователя вторичного прибора и его стрелка займут положение, соответствующее углу поворота рамки преобразователя первичного прибора, а следовательно, и значению измеряемой величины.

Принципиальная схема дистанционной передачи сигнала измерительной информации первичного прибора с помощью дифференциально-трансформаторного передающего преобразователя *ПД* на вторичный прибор, снабженный ферродинамическим компенсирующим преобразователем ПФ-2, изображена на рис. 8-5-6.

Первичная обмотка преобразователя *ПД* и обмотка возбуждения преобразователя ПФ-2 соединены последовательно и питаются переменным током напряжением 24 В, 50 Гц. Выходная обмотка преобразователя *ПД* и обмотка рамки преобразователя ПФ-2 соединены по компенсационной схеме.

Действие измерительной схемы дистанционной передачи с использованием передающего преобразователя *ПД* в первичном приборе и компенсирующего преобразователя ПФ-2 во вторичном приборе аналогично действию рассмотренной схемы дистанционной передачи с применением преобразователей ПФ-2.

В рассмотренных схемах дистанционной передачи (рис. 8-5-5 и 8-5-6) в качестве вторичного прибора *ВП* применяют миниатюрные показывающий типа ВФП или самопишущий типа ВФС. Эти приборы могут быть снабжены двумя выходными преобразователями ПФ, ПС или ПП, а также контактным устройством для сигнализации или регулирования.

8-6. Механоэлектрические передающие преобразователи

Механоэлектрические передающие преобразователи типа МП-Л, разработанные СКБ ЭАУС, изготовляются в виде отдельного блока, устанавливаемого как дополнительное устройство в дифманометрах ДС, манометрах и других приборах, выпускаемых казанским заводом «Теплоконтроль», для преобразования их сигнала измерительной информации в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА.

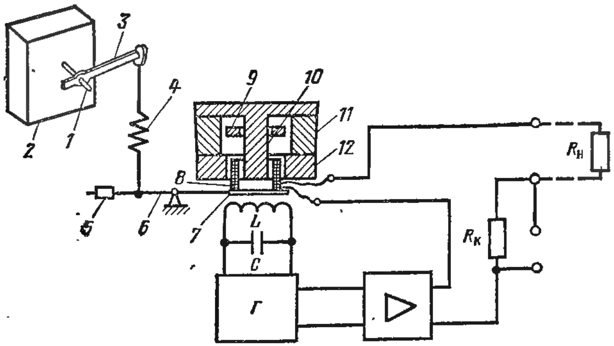


Рис. 8-6-1. Принципиальная схема механоэлектрического передающего преобразователя типа МП-Л.

Принципиальная схема механоэлектрического передающего преобразователя типа МП-Л приведена на рис. 8-6-1. Угловое перемещение выходной оси *1* первичного прибора *2*, кинематически связанной с его чувствительным элементом, преобразуется при помощи кривошипа *3* и тяги в поступательное перемещение с одновремен-

ным преобразованием его цилиндрической пружиной *4* в усилие, прикладываемое к левому плечу коромысла *6*. На другом плече коромысла укреплен дюралюминиевый флажок *7*, к которому жестко прикреплена рамка *8* обратной связи. Флажок преобразователя находится в высокочастотном поле катушки индуктивности L, выполненной в виде однорядной плоской спирали. Катушка индуктивности с конденсатором C образуют базовый контур $L—C$ генератора $Г$.

При перемещении коромысла, а вместе с тем и флажка, изменяются индуктивность катушки, а следовательно, и параметры контура $L—C$, что приводит к изменению режима работы генератора и постоянного напряжения на нагрузочном сопротивлении генератора. Выходной сигнал генератора усиливается усилителем постоянного тока.

В выходную цепь усилителя постоянного тока включены обмотка рамки обратной связи, калиброванный резистор $R_к$ и резистор внешней нагрузки $R_н$ (вторичных приборов и линий связи). Обмотка рамки находится в кольцевом зазоре, образованном сердечником *10* и полюсной накладкой *12*. Между основанием сердечника и полюсной накладкой расположен постоянный магнит *11*, имеющий форму усеченного конуса. При протекании тока через обмотку рамки обратной связи она будет втягиваться в зазор, создавая усилие $q_{о. с}$, а следовательно, и момент, противодействующий моменту, создаваемому усилием q цилиндрической пружины при ее растяжении. Изменение выходного тока усилителя будет происходить до тех пор, пока эти моменты не уравняются.

Внутри постоянного магнита предусмотрен шунт *9*, который можно перемещать вдоль сердечника *10* с помощью специальных винтов (на рис. 8-6-1 не показаны), изменяя индукцию в зазоре, а вместе с тем и диапазон выходного сигнала преобразователя.

Калиброванный резистор $R_к$ предназначен для контроля работы преобразователя с помощью переносного потенциометра постоянного тока (без выключения его из работы). Этот резистор может быть также использован для получения унифицированного выходного напряжения постоянного тока 0—100 мВ.

Подвижная система преобразователя должна находиться в положении безразличного равновесия, что достигается балансировкой с помощью груза *5*. Подвижная система преобразователя электрически изолирована с помощью прокладок от металлических его частей для устранения гальванической связи с землей.

Суммарное сопротивление внешней нагрузки $R_н$ преобразователя, обусловленное подключением вторичных приборов, регулирующих приборов, информационно-вычислительных машин и линиями связи дистанционной передачи, не должно превышать 2,5 кОм.

В качестве вторичных приборов могут быть использованы миллиамперметры типа КПУ, КСУ и другие приборы, рассчитанные на унифицированный входной сигнал постоянного тока 0—5 мА.

8-7. Передающие преобразователи с магнитной компенсацией

Передающие преобразователи с магнитной компенсацией предназначены для преобразования перемещения центра или сводного конца упругого чувствительного элемента (§ 10-2) прибора, воспринимающего измеряемую величину, в унифицированный выходной сигнал постоянного тока. Преобразователи с магнитной компенсацией, предложенные В. Д. Мироновым, И. Б. Каплуновым и др. [47] и конструктивно разработанные совместно с НИИТеплоприбором, выполняются с линейной и квадратичной характеристикой.

Преобразователи с линейной характеристикой предназначены для первичных приборов с упругими чувствительными элементами, применяемых для измерения, например, давления, разности давлений и уровня жидкости. Для этих приборов выходной сигнал посто-

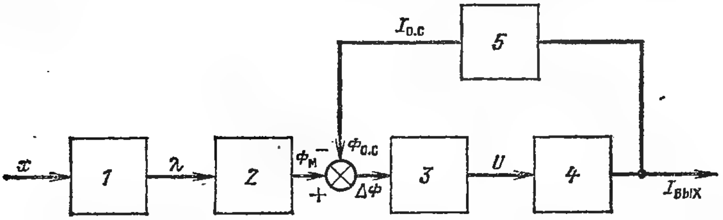


Рис. 8-7-1. Структурная схема преобразователя с магнитной компенсацией.

1 — упругий чувствительный элемент первичного прибора, преобразующий измеряемую величину в перемещение λ; 2 — постоянный магнит (магнитный плунжер); 3 — магнитное преобразовательное устройство; 4 — усилитель полупроводниковый; 5 — устройство обратной связи.

янного тока преобразователя будет пропорционален измеряемой величине.

Преобразователи с квадратичной характеристикой предназначены для дифманометров (гл. 12), применяемых для измерения расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве, связанному с расходом квадратичной зависимостью. Выходной сигнал постоянного тока преобразователя с квадратичной характеристикой пропорционален измеряемому расходу.

Структурная схема преобразователя с магнитной компенсацией показана на рис. 8-7-1. Магнитный плунжер служит для преобразования перемещения λ центра или свободного конца упругого чувствительного элемента в управляющий магнитный поток $\Phi_м$. Магнитное преобразовательное устройство предназначено для преобразования разности магнитных потоков $\Delta\Phi = \Phi_м - \Phi_{о.с}$, создаваемых постоянным магнитом и током обратной связи $I_{о.с}$, в электрический сигнал U. Снимаемый сигнал с выхода магнитного преобразовательного устройства подается на вход полупроводникового усилителя, который усиливает его и преобразовывает в выходной сигнал постоянного тока $I_{вых} = 0 \div 5$ мА. Устройство отрицательной

обратной связи позволяет установить необходимый закон преобразования.

Выходной сигнал U магнитного преобразовательного устройства определяется выражением

$$U = k_1 x_{м.п} - k_2 I_{о.с}, \tag{8-7-1}$$

где $x_{м.п}$ — перемещение магнитного плунжера; $I_{о.с} = f_{о.с}(I_{вых})$ — ток обратной связи; k_1 и k_2 — постоянные коэффициенты.

Выходной ток полупроводникового усилителя преобразователя

$$I_{вых} = k_у U, \tag{8-7-2}$$

где $k_у$ — коэффициент передачи усилителя.

Для преобразователя с линейной характеристикой

$$x_{м.п} = Ax \quad и \quad I_{о.с} = k_{о.с} I_{вых}, \tag{8-7-3}$$

где A — постоянный коэффициент; $k_{о.с}$ — коэффициент передачи устройства обратной связи.

На основании соотношений (8-7-1) — (8-7-3) получим:

$$I_{вых} = x_{м.п} \frac{k_1}{\frac{1}{k_у} + k_2 k_{о.с}}.$$

При достаточно большом коэффициенте передачи полупроводникового усилителя ($k_у \to \infty$) это выражение принимает вид:

$$I_{вых} = x_{м.п} \frac{k_1}{k_2 k_{о.с}} = x \frac{Ak_1}{k_2 k_{о.с}}. \tag{8-7-4}$$

При линейном преобразовании входного сигнала отрицательная обратная связь образуется резистором, через который протекает выходной ток.

Для получения пропорциональной зависимости выходного тока $I_{вых}$ передающего преобразователя дифманометра от расхода среды Q, измеряемого по перепаду давления Δp в сужающем устройстве, когда

$$x_{м.п} = A\Delta p = BQ^2, \tag{8-7-5}$$

необходима нелинейная обратная связь с подобной (8-7-5) зависимостью

$$I_{о.с} = k'_{о.с} I^2_{вых}.$$

Подставив эти зависимости в соотношения (8-7-1) и (8-7-2), при $k_у \to \infty$ получим:

$$I_{вых} = Q \sqrt{\frac{Bk_1}{k_{о.с} k_2}}. \tag{8-7-6}$$

Квадратичный закон преобразования измеряемой величины формируется путем включения в цепь отрицательной обратной связи нелинейных элементов или с помощью квадратора.

Принципиальная электрическая схема передающего преобразователя с магнитной компенсацией приведена на рис. 8-7-2. Магнитное преобразовательное устройство передающего преобразователя имеет две обмотки возбуждения $w_в$, $w'_в$ и две обмотки обратной связи $w_{о.с}$ и $w'_{о.с}$, расположенные на двух специальной формы магнитопроводах M_1 и M_2. Цепь возбуждения содержит диоды $Д_1$, $Д_2$ и балластные резисторы R_1 и R_2. Обмотки возбуждения $w_в$, $w'_в$ и балластные резисторы R_1 и R_2 образуют измерительную схему моста. В выходную цепь моста включен фильтрующий конденсатор C. Питание моста осуществляется от силового трансформатора усилителя напряжением в виде прямоугольных импульсов с частотой 50 Гц, формируемых с помощью стабилитрона и ограничительного резистора. В выходную цепь усилителя включены устройство обратной связи *УОС* и нагрузка $R_н$.

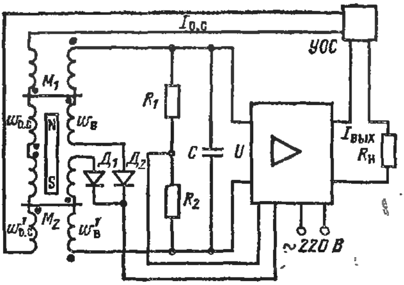


Рис. 8-7-2. Принципиальная схема преобразователя с магнитной компенсацией.

Обмотки возбуждения, расположенные на магнитопроводах M_1 и M_2, включены встречно и сфазированы таким образом, что в магнитопроводах магнитный поток, создаваемый одной из них ($w_в$), направлен согласно с управляющим магнитным потоком постоянного магнита NS, а другой ($w'_в$) — встречно. Обмотки обратной связи, расположенные на тех же магнитопроводах M_1 и M_2, также включены встречно, что позволяет скомпенсировать наводимые в них э. д. с. от обмоток возбуждения. Магнитные потоки в магнитопроводах M_1 и M_2, создаваемые током $I_{о.с}$ при протекании его по обмоткам обратной связи, направлены навстречу магнитным потокам постоянного магнита.

Рассмотрим конструктивную схему магнитного преобразовательного устройства, представленную на рис. 8-7-3. Этот узел преобразователя состоит из внешних (вспомогательных) магнитопроводов *1*, в средней части которых расположены магнитные элементы *2* (магнитопроводы M_1 и M_2 специальной формы, каждый из которых несет обмотку обратной связи и обмотку возбуждения), и магнитного плунжера *3*, представляющего собой небольшой цилиндрический постоянный магнит. Магнитный плунжер, механически соединяемый со свободным концом или центром упругого чувствительного элемента первичного прибора, может применяться с разделительной немагнитной стальной трубкой *4* (показана пунктиром) и без нее.

Основной магнитный поток магнитного плунжера замыкается через вспомогательные магнитопроводы. В измерительные магнитные элементы вследствие наличия относительно больших воздушных зазоров ответвляется только некоторая часть магнитного потока

в виде потоков рассеивания. При нейтральном положении магнитного плунжера (рис. 8-7-3, *а*) ответвляемые в магнитные элементы магнитные потоки имеют противоположное направление и равны по своему значению. Поэтому результирующий магнитный поток практически равен нулю. Смещение магнитного плунжера в ту или другую сторону от нейтрального положения нарушает симметрию, в результате чего магнитные элементы возбуждаются результирующим магнитным потоком (рис. 8-7-3, *б*). Направление магнитного потока в магнитиых элементах (магнитопроводах M_1 и M_2 — рис. 8-7-2) зависит от направления перемещения магнитного плунжера и его полярности.

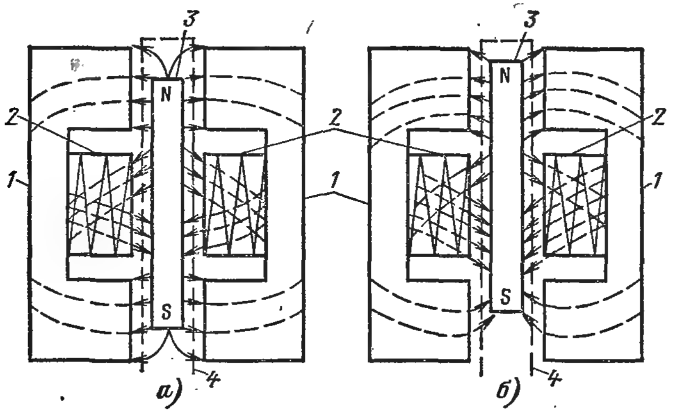


Рис. 8-7-3. Конструктивная схема магнитного преобразовательного устройства преобразователя с магнитной компенсацией.

При нейтральном положении магнитного плунжера (рис. 8-7-3, *а*) токи, протекающие в обмотках возбуждения $w_в$ и $w'_в$, равны и противоположны по направлению, и выходной сигнал U (разность напряжений на балластных резисторах R_1 и R_2) равен нулю. При смещении магнитного плунжера (рис. 8-7-3, *б*) на магнитопроводы M_1 и M_2 (рис. 8-7-2) действует магнитный поток постоянного магнита, который в одном магнитопроводе, например M_1, оказывает подмагничивающее действие, складываясь с магнитным потоком от обмотки возбуждения $w_в$, а в другом, M_2 — размагничивающее действие. Вследствие этого в магнитопроводе M_1 наступает состояние насыщения раньше, чем в магнитопроводе M_2, и, следовательно, значение среднего тока, протекающего через обмотку возбуждения $w_в$ и балластный резистор R_1, будет больше, чем в цепи R_2 — $w'_в$. Снимаемый с балластных регисторов R_1 и R_2 сигнал будет пропорционален управляющему воздействию магнитного потока постоянного магнита.

Магнитные потоки обратной связи в магнитопроводах M_1 и M_2 направлены навстречу магнитным потокам постоянного магнита.

Магнитный поток обратной связи в магнитопроводе M_1 направлен навстречу магнитному потоку от обмотки возбуждения $w_в$, а в магнитопроводе M_2 совпадает по направлению с магнитным потоком от обмотки возбуждения $w'_в$. Работа магнитного преобразовательного устройства при управлении постоянным током обратной связи происходит аналогично управлению магнитным потоком постоянного магнита. При смещенном постоянном магните (рис. 8-7-3, *б*) снимаемый с балластных резисторов R_1 и R_2 сигнал будет пропорционален результирующему управляющему воздействию магнитных потоков постоянного магнита и обратной связи.

Суммарное сопротивление внешней нагрузки $R_н$ передающего преобразователя с магнитной компенсацией, обусловленное подключением вторичного прибора, регулирующего прибора, информационно-вычислительной машины и линиями связи дистанционной передачи, не должно превышать 2,5 кОм.

В качестве вторичных приборов могут быть использованы показывающие, показывающие и самопишущие миллиамперметры КПУ1, КВУ1, КСУ1, КСУ2, КСУ3 и КСУ4.

Приборы с упругими чувствительными элементами, снабженные передающими преобразователями с магнитной компенсацией, изготовляются казанским заводом «Теплоконтроль».

8-8. Электросиловые преобразователи

Электросиловые преобразователи предназначены для преобразования усилия чувствительного элемента измерительных устройств, воспринимающего измеряемую величину, в унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 или 0—20 мА. Унифицированные электросиловые преобразователи и рассматриваемые ниже средства измерений, созданные на их базе, разработаны НИИТеплоприбором совместно с московским приборостроительным заводом «Манометр». Электросиловые преобразователи, конструктивно сочленяемые с измерительными блоками приборов, выпускают с линейной и квадратичной характеристикой.

Преобразователи с линейной характеристикой ЭЛП используются в первичных приборах для измерения абсолютного, вакуумметрического и избыточного давлений, разности давлений, тяги и напора, уровня и плотности жидких сред и других величин. Для средств измерений этого типа выходной сигнал пропорционален измеряемой величине. Электросиловые преобразователи с квадратичной характеристикой ЭКП применяют в дифманометрах (гл. 12), предназначенных для измерения расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве. В этом случае выходной сигнал дифманометра будет пропорционален измеряемому расходу.

В основу построения рассматриваемых преобразователей положен принцип силовой компенсации. Преобразователи представляют

собой электрические измерительные устройства с отрицательной обратной связью.

Принципиальная схема линейного электросилового преобразователя (ЭЛП) показана на рис. 8-8-1. Измеряемая величина x воспринимается чувствительным элементом измерительного устройства *1* и преобразовывается в пропорциональное усилие q. Это усилие через рычажную систему *3* и *4* передаточного механизма электросилового преобразователя *2* автоматически уравновешивается усилием $q_{о.с}$, развиваемым в магнитоэлектрическом силовом механизме обратной связи. Механизм обратной связи состоит из стержневого постоянного магнита NS, магнитопровода из магнитомягкой стали, представляющего собой П-образное основание, и полюсной накладки *11*, образующей с цилиндрической шейкой магнита кольцевой зазор.

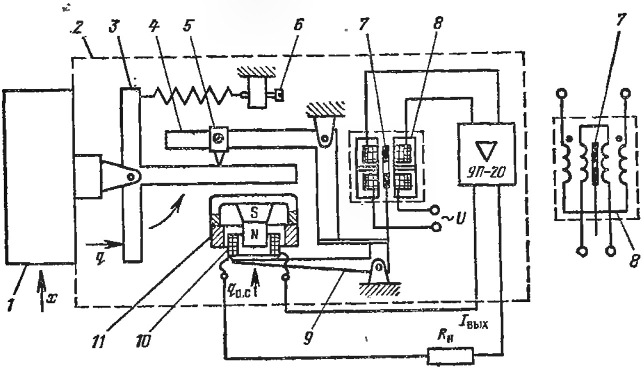


Рис. 8-8-1. Принципиальная схема линейного электросилового преобразователя.

В этом зазоре помещена круглая рамка *10*, закрепленная на подвижном рычаге *9* блока обратной связи преобразователя. Внешнее расположение магнитопровода по отношению к магниту обеспечивает надежное экранирование магнитоэлектрического устройства и уменьшает потоки рассеяния. При протекании выходного постоянного тока $I_{вых}$ через обмотку рамки магнитоэлектрического механизма возникает усилие обратной связи $q_{о.с}$. Значение этого усилия определяется выражением

$$q_{о.с} = lnBI_{вых},$$

где l — средняя длина витка рамки, м; n — число витков; $I_{вых}$ — сила тока, А; B — магнитная индукция в зазоре, Т.

При изменении измеряемой величины, а следовательно, и усилия q происходит незначительное перемещение рычажной системы *3* и *4* и связанного с подвижным рычагом *9* управляющего флажка *7* индикатора рассогласования *8*, выполненного по дифференциально-трансформаторной схеме и снабженного пермаллоевым экраном (экран показан пунктиром). Индикатор рассогласования преобразует это перемещение в сигнал рассогласования — э. д. с. перемен-

ного тока. Этот сигнал поступает на вход усилителя УП-20, служащего для усиления и преобразования э. д. с. рассогласования в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0—5 или 0—20 мА (в зависимости от параметров обмотки рамки *10* и настройки усилителя УП-20).

Выходной сигнал постоянного тока $I_{\text{вых}}$ усилителя поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в последовательно соединенную с ней обмотку рамки магнитоэлектрического силового механизма обратной связи, где преобразуется в пропорциональное усилие $q_{\text{о. с}}$. Мерой входного усилия q, а следовательно, и измеряемой величины x является текущее значение выходного сигнала $I_{\text{вых}}$ преобразователя, необходимое для создания уравновешивающего усилия обратной связи $q_{\text{о. с}}$.

Настройка преобразователя на заданный диапазон измерения величины x осуществляется плавным изменением передаточного отношения рычажной системы. Изменение передаточного отношения рычажной системы достигается перестановкой подвижной опоры *5* вдоль рычагов *3* и *4*. Значение выходного сигнала преобразователя, соответствующее $x = 0$, устанавливается с помощью пружины-корректора нуля *6*.

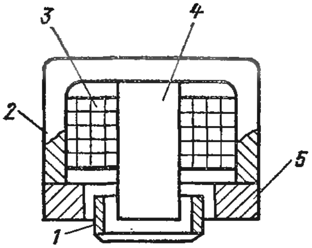


Рис. 8-8-2. Схема устройства электромагнитного силового механизма обратной связи.

В электросиловом преобразователе, применяемом в дифманометрах-расходомерах, квадратичная зависимость между усилием обратной связи $q_{\text{о.с}}$ и выходным сигналом $I_{\text{вых}}$ преобразователя обеспечивается применением электромагнитного силового механизма обратной связи вместо магнитоэлектрического. Схема устройства электромагнитного силового механизма обратной связи электросилового квадратичного преобразователя ЭКП показана на рис. 8-8-2. Этот механизм по своему устройству аналогичен магнитоэлектрическому, но здесь вместо постоянного магнита используется цилиндрический стержень *4*, укрепленный на магнитопроводе *2*, и неподвижная катушка *3*, которая создает магнитное поле в кольцевом зазоре, образованном стержнем и полюсной накладкой *5*, при протекании постоянного выходного тока $I_{\text{вых}}$ по ее обмотке. В магнитном поле кольцевого зазора находится ферромагнитный кольцевой плунжер *1*, который жестко крепится к рычагу *9* блока обратной связи преобразователя (рис. 8-8-1). Усилие обратной связи $q_{\text{о. с}}$ в этом случае пропорционально квадрату тока, протекающего по обмотке катушки, т. е. $q_{\text{о. с}} = kI^2_{\text{вых}}$. Преобразователи типа ЭКП выпускаются с значением выходного сигнала 0,3—5 или 1,2—20 мА.

Суммарное сопротивление внешней нагрузки $R_{\text{н}}$ усилителя преобразователя, обусловленное подключением вторичного прибора, измерительного блока регулятора и информационно-вычислитель-

ной машины и линиями связи дистанционной передачи, не должно превышать при выходном токе 5 мА 2,5 кОм, а при 20 мА — 1,0 кОм.

Усилитель УП-20, схема которого приведена на рис. 8-8-3, состоит из предварительного усилителя напряжения, фазочувствительного выпрямителя, корректирующих цепей, усилителя постоянного тока и устройства питания.

Предварительный усилитель напряжения имеет два непосредственно связанных каскада, собранных по схеме с общим эмиттером на триодах T_1 и T_2 (типа П21А), с отрицательной обратной связью по постоянному току параллель-

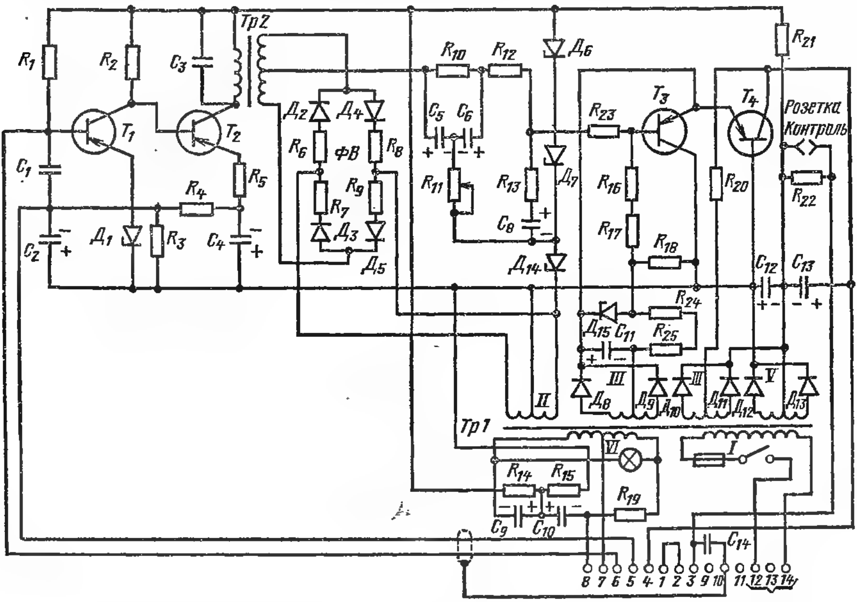


Рис. 8-8-3. Принципиальная электрическая схема усилителя типа УП-20.

ного типа — эмиттер T_2 — база T_1 (R_3, R_4, R_5, C_2, C_4). Стабилитрон $Д_1$ (типа Д808), включенный в цепь эмиттера триода T_1, увеличивает глубину отрицательной обратной связи по постоянному току. Резистор R_5 служит для регулировки коэффициента усиления усилителя при его настройке. Колебательный контур, включенный в коллекторную цепь триода T_2, корректирует фазовую характеристику усилителя.

С выхода предварительного усилителя напряжения усиленный сигнал переменного тока через согласующий трансформатор *Тр2* поступает на фазочувствительный выпрямитель *ФВ*, построенный по схеме кольцевого демодулятора. Коммутирующее напряжение на диоды $Д_2$ — $Д_5$ (типа Д220Б) подается со вторичной обмотки *II* трансформатора *Тр1*. После фильтрации и обработки сигнала корректирующими цепями R_{10}—R_{13}, C_5, C_6 и C_8 напряжение постоянного тока подается на двухкаскадный усилитель постоянного тока T_3 и T_4. Первый каскад собран по схеме с общим коллектором, второй — по схеме с общей базой. При отсутствии сигнала триод T_3 (П21А) открыт, T_4 (П304) почти закрыт. Остаточный ток триода T_4, протекающий через нагрузку, компенсируется током противоположного направления от отдельного источника напряжения ($Д_{10}$, $Д_{11}$). Для увеличения его внутреннего сопротивления включен резистор R_{20}.

При увеличении сигнала постоянного тока триод T_3 запирается, а триод T_4 открывается, что соответствует возрастанию коллекторного тока. В коллекторную

цепь выходного триода T_4 (клеммы *4, 1*) последовательно включается рамка магнитоэлектрического силового механизма обратной связи (рис. 8-8-1), а с клемм *2* и *3* выходной сигнал постоянного тока усилителя поступает в линию дистанционной передачи.

Резистор R_{17} служит для подгонки нулевого значения выходного тока при настройке усилителя. Для питания схемы усилителя используются три выпрямителя: $Д_8$—$Д_9$, $Д_{10}$—$Д_{11}$, $Д_{12}$—$Д_{13}$, собранные по двухполупериодной схеме с использованием диодов соответственно Д207, Д220Б и Д207. Конденсаторы C_{11}—C_{13} служат для уменьшения пульсаций выходного сигнала.

Напряжение с шестой обмотки трансформатора *Тр1* через фазовращатель C_9, C_{10}, R_{19} и клеммы *7, 8* подается для питания первичной обмотки индикатора рассогласования, а через клеммы *5, 6* на вход усилителя поступает сигнал напряжения переменного тока от индикатора рассогласования (рис. 8-8-1). Питание усилителя осуществляется от сети переменного тока частотой 50 ± 1 Гц, напряжением 220^{+22}_{-33} В (клеммы *12, 14*).

8-9. Частотные преобразователи со струнным вибратором

В системах автоматического технологического контроля, регулирования и управления в металлургической и некоторых других отраслях промышленности находят применение частотные преобразователи со струнным вибратором. Выходной частотный сигнал измерительной информации этих преобразователей может быть введен непосредственно в цифровые измерительные устройства и машины. Частотные преобразователи обладают малой погрешностью и позволяют передавать сигнал измерительной информации по каналам связи на большие расстояния.

Применяемый струнный вибратор с магнитоэлектрическим способом возбуждения представляет собой струну, расположенную между полюсами постоянного магнита. Один конец струны жестко закреплен, второй связан с кинематической системой, изменяющей натяжение струны. Известно, что частота первой гармоники собственных колебаний такой струны определяется выражением

$$f = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{q}{\rho}}, \tag{8-9-1}$$

где l — длина рабочей части струны, м; q — сила натяжения струны, Н; ρ — масса на единицу длины струны, кг/м.

Если по струне пропустить переменный ток, то при взаимодействии его с магнитным полем постоянного магнита возникнут вынужденные колебания струны. При совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой возникают резонансные колебания струны.

Следует отметить, что свободные колебания струны из-за наличия трения о воздух, трения струны в местах закрепления, потерь на вязкость в материале струны являются затухающими, поэтому для поддержания незатухающих колебаний к струне непрерывно должна подводиться энергия.

Для анализа работы и расчета струнного вибратора удобно использовать эквивалентную электрическую схему в виде колеба-

тельного LC-контура (рис. 8-9-1, *а*) с параметрами, выраженными через параметры струнного вибратора:

$$R_д = \frac{B^2 l}{4k\rho}; \quad L = \frac{B^2 l^3}{2\pi^2 q}; \quad C = \frac{2\rho}{B^2 l}; \quad R_с, \qquad (8\text{-}9\text{-}2)$$

где B — магнитная индукция в зазоре магнита; k — коэффициент затухания свободно колеблющейся струны; L — эквивалентная индуктивность; C — эквивалентная емкость; $R_с$ — активное сопротивление неподвижной струны; $R_д$ — динамическое сопротивление струны.

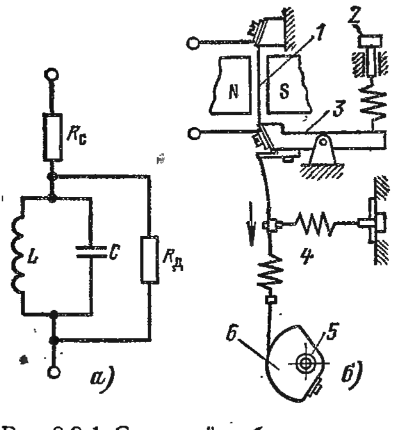


Рис. 8-9-1. Струнный вибратор преобразователя типа ПС.

а — эквивалентная схема колебательной системы; *б* — схема устройства струнного вибратора.

Значение $R_д$ определяют обычно по формуле

$$R_д = \frac{B^2 l Q}{4\pi\rho f},$$

где Q — добротность резонансного контура, определяемая экспериментально.

При резонансной частоте эквивалентное сопротивление струны $R_э$ будет равно $R_э = R_д + R_с$, а на частотах, лежащих достаточно далеко от резонансной, сопротивление $R_э$ приближается к значению $R_с$.

Рассмотрим в качестве примера частотный преобразователь со струнным вибратором типа ПС, выпускаемый Харьковским заводом КИП [17]. Этот преобразователь предназначен для преобразования угловых перемещений в унифицированный частотный выходной сигнал. Преобразователи типа ПС применяются в качестве передающих сигнал измерительной информации вторичных и других приборов (например, КСПЗ, КСМЗ, КСДЗ, ВФС) и компенсирующих узлов автоматических измерительных устройств, например, безреохордных потенциометров (§ 4-23). Преобразователь ПС изготовляют в виде отдельного блока. Схема устройства струнного вибратора преобразователя типа ПС показана на рис. 8-9-1, *б*. Он состоит из постоянного магнита NS, между полюсами которого натянута струна *1* из немагнитного материала (вольфрама). Верхний конец струны жестко закреплен в зажиме на неподвижном основании, а нижний — на подвижном кронштейне *3*. Регулировка начального натяжения струны осуществляется корректором нуля *2*. В преобразователе типа ПС корректор нуля выполнен в виде эксцентрика. Подвижный кронштейн связан с входной осью *5* с помощью кулачка *6*, гибкой ленты и двух пружин *4*, образующих механический квадратор. Угол поворота входной оси, а следовательно, и кулачка ограничен упорами, которые на схеме не пока-

заны. Рабочий диапазон изменения угла поворота входной оси составляет 40°.

По данным [17] значение добротности Q такого струнного вибратора равно 400—800, а динамическое сопротивление колеблющейся струны на резонансной частоте $R_д \approx 2$ Ом (при $R_с = 1$ Ом).

Необходимость введения в схему механического квадратора объясняется следующим. Из уравнения (8-9-1) видно, что струнный вибратор имеет нелинейную характеристику. Если бы зависимость силы натяжения струны q от угла поворота α была линейной $q = k_1\alpha$, то очевидно, что характеристика преобразователя была бы нелинейной:

$$f = k_2\sqrt{k_1\alpha},$$

где k_2 — коэффициент, определяемый геометрическими размерами и материалом струны.

Квадратор позволяет преобразовать угловое перемещение входной оси α (предварительно преобразованное с помощью кулачка и гибкой ленты в поступательное перемещение) в растягивающее усилие q в соответствии с зависимостью

$$q = \frac{\alpha^2}{k_3^2},$$

где k_3 — постоянный коэффициент.

В этом случае характеристика преобразователя будет иметь вид:

$$f = \frac{k_2}{k_3}\alpha,$$

т. е. механический квадратор дает возможность линеаризовать характеристику струнного вибратора и, следовательно, всего преобразователя. Практически линеаризация характеристики достигается изменением жесткости пружин и подбором необходимого угла между ними.

Электрическая схема преобразователя *ПС* представлена на рис. 8-9-2. С выходной диагонали моста сигнал через согласующий трансформатор *Тр*1 поступает на транзисторный усилитель *У*, питаемый напряжением 24 В, частотой 50 Гц через выпрямитель *В*. С верхней части вторичной обмотки выходного трансформатора *Тр2* усилителя подается напряжение питания на возбуждающую диагональ моста. Поскольку мост включен в цепь положительной обратной связи усилителя, то система «мост—усилитель» представляет

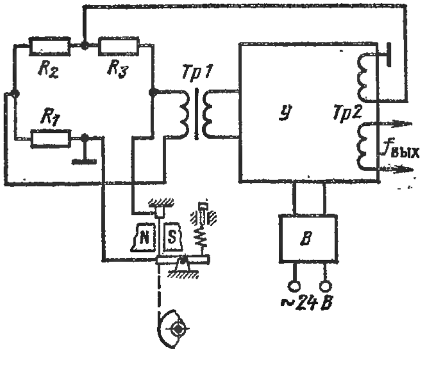


Рис. 8-9-2. Схема частотного преобразователя со струнным вибратором типа ПС.

собой автогенератор. Выходной частотный сигнал, зависящий от силы натяжения струны и, следовательно, угла поворота входной оси преобразователя, снимается с нижней части вторичной обмотки трансформатора *Тр2*.

В рассматриваемой схеме преобразователя мост, состоящий из резисторов с активными сопротивлениями $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = R_3 = 13$ Ом и струны $R_с = 1$ Ом, предназначен для разделения цепей возбуждения и съема сигнала. При неподвижной струне мост сбалансирован и напряжение питания, поданное на возбуждающую диагональ его, не проходит на диагональ съема сигнала. При возбуждении автоколебаний увеличивается эквивалентное сопротивление струны $R_э = R_д + R_с$, мост разбалансируется, и в диагонали съема сигнала появляется напряжение.

Для стабилизации работы моста в широком интервале температур резистор R_1 изготовлен из медной проволоки, так как температурный коэффициент электрического сопротивления меди примерно такой же, как и вольфрама.

Преобразователь типа ПС имеет рабочие пределы изменения частоты выходного сигнала от 4 до 8 кГц. Пределы допускаемой основной погрешности не превышают ± 0,4% диапазона изменения частоты выходного сигнала, что составляет ± 0,016 кГц. Нелинейность выходного сигнала не более 0,5% рабочего диапазона изменения частоты. Вариация частоты выходного сигнала не превышает ± 0,25% рабочего диапазона частоты.

Изменение частоты выходного сигнала преобразователя, вызванное изменением температуры окружающего воздуха от 20±5°C до любой температуры в пределах от 5 до 80°C, на каждые 10°C не превышает 0,05% нормирующего значения измеряемой величины.

Амплитудное значение э. д. с. выходного сигнала преобразователя ПС равно 1,2±0,2 В при сопротивлении нагрузки не менее 100 Ом. Выходной трансформатор *Тр2* преобразователя ПС имеет вторую вторичную обмотку для съема выходного сигнала (на рис. 8-9-2 не показана). Амплитудное значение э. д. с. выходного сигнала на второй обмотке равно 0,6 ± 0,1 В при сопротивлении нагрузки не менее 50 Ом.

8-10. Пневмосиловые преобразователи

Пневмосиловые преобразователи предназначены для преобразования усилия чувствительного элемента измерительных блоков приборов в унифицированный пневматический выходной сигнал 0,2—1 кгс/см² (около 0,02—0,1 МПа). Пневмосиловые преобразователи и первичные приборы, созданные на их базе, разработаны НИИТеплоприбором совместно с московским заводом «Манометр». Пневмосиловые преобразователи, конструктивно сочленяемые с измерительным блоком прибора, выпускаются с линейной характеристикой.

В основу построения пневмосиловых преобразователей положен принцип силовой компенсации. В конструкции пневмосиловых преобразователей используются основные узлы рычажной системы механизма рассмотренного выше электросилового преобразователя.

Принципиальная схема пневмосилового преобразователя показана на рис. 8-10-1. Измеряемая величина x или выходная величина первичного преобразователя воспринимается чувствительным элементом измерительного устройства *1* и преобразовывается в пропорциональное усилие q. Это усилие через рычажную систему *2* и *3* передаточного механизма преобразователя *6* автоматически уравновешивается усилием $q_{о.с}$, развиваемым сильфоном обратной связи *12*. При изменении измеряемой величины x, а вместе с тем и усилия q, происходит незначительное перемещение рычажной

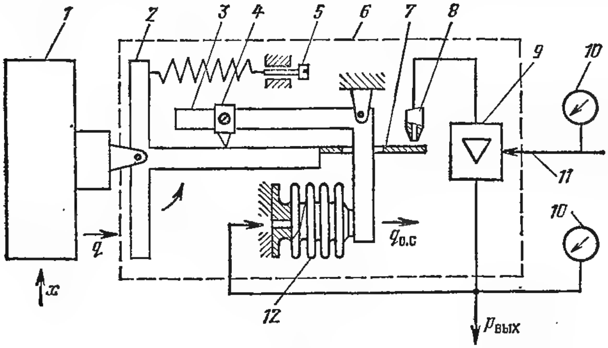


Рис. 8-10-1. Принципиальная схема пневмосилового преобразователя.

системы *2* и *3* и связанной с рычагом *2* заслонки *7* индикатора рассогласования. Индикатор рассогласования (сопло-заслонка) преобразует это перемещение в управляющий сигнал давления сжатого воздуха в линии сопла *8*. Этот сигнал рассогласования управляет выходным сигналом давления сжатого воздуха пневматического усилителя мощности *9*. Выходной сигнал усилителя $p_{вых}$ поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в сильфон обратной связи *12*, где преобразуется в пропорциональное ему усилие $q_{о.с}$. Это усилие через рычажный передаточный механизм *2* и *3* уравновешивает входное усилие q. Мерой входного усилия q, а следовательно, и измеряемой величины x является текущее значение выходного сигнала давления сжатого воздуха $p_{вых}$ пневматического усилителя, необходимое для создания уравновешивающего усилия обратной связи $q_{о.с}$. Пределы изменения пневматического выходного сигнала преобразователя 0,2—1 кгс/см^2 (0,02—0,1 МПа).

Настройка пневмосилового преобразователя на заданный диапазон входного усилия q, а вместе с тем и измеряемой величины x осуществляется изменением передаточного отношения рычажной

системы передаточного механизма. Изменение передаточного отношения рычажной системы достигается плавной перестановкой подвижной опоры *4* вдоль рычагов *2* и *3*. Установка начального значения выходного сигнала преобразователя 0,2 кгс/см² (0,02 МПа) производится при помощи корректора нуля *5*. Для устранения автоколебаний в пневмосиловом преобразователе предусмотрен жидкостной демпфер (на рис. 8-10-1 не показан).

Питание пневматического усилителя преобразователя осуществляется через линию *11* очищенным от пыли, влаги и масла сжатым воздухом под давлением 1,4 ± 0,14 кгс/см² (0,14 ± 0,014 МПа), контролируемым манометром *10*.

В пневмосиловых преобразователях, а также и в других преобразователях с пневматическим выходным сигналом используется унифицированный пневматический усилитель мощности, схема которого показана на рис. 8-10-2. Сжатый очищенный воздух через фильтр и редуктор из магистрали питания под давлением $p_{пит} = 1,4$ кгс/см² (0,14 МПа) подается в камеру *1*, из которой через отверстие, регулируемое шариковым клапаном *12*, он поступает в камеры выхода *8* и *11*. Давление в этих камерах определяется эффективной площадью мембраны *2* и силой упругости пружины *3* и равно 30—50 мм рт. ст. (4000—6700 Па), когда сопло *4* индикатора рассогласования полностью открыто. В линию сопла сжатый воздух поступает через дроссель *9* и камеру *10*.

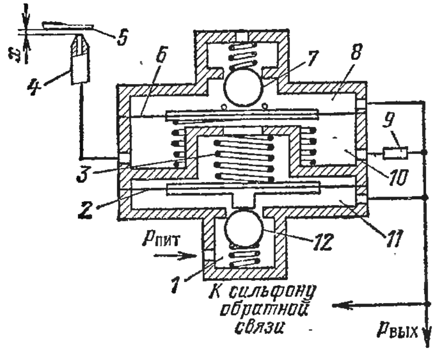


Рис. 8-10-2. Схема устройства пневматического усилителя мощности.

Уменьшение зазора *x* между соплом *4* и заслонкой *5* приводит к повышению давления воздуха в линии сопла *4*, а вместе с тем и в камере *10* и нарушению равновесия сил, действующих на мембраны *2* и *6*. Мембрана *6* действует на шариковый клапан *7*, прикрывающий отверстие сброса воздуха в атмосферу, а мембрана *2* с помощью шарикового клапана *12* открывает канал притока воздуха из камеры *1*. Давление в камерах *8* и *11* повышается до восстановления равновесия сил на мембранах. При этом сохраняется постоянный перепад давления на дросселе *9*, равный 30—50 мм рт. ст. (4000—6700 Па) и определяющийся усилием пружины *3* и эффективной площадью мембраны *2*. При уменьшении давления в линии сопла, а следовательно, и в камере *10* силы на мембранах действуют в обратном направлении, что вызывает уменьшение давления воздуха в камерах *8* и *11*.

Автоматическое поддержание постоянного перепада давления на дросселе с диаметром отверстия 0,4 мм позволяет обеспечить малый расход воздуха в линии сопла и уменьшить рабочий ход заслонки *5* индикатора рассогласования до 0,01 мм при проходном отверстии сопла 0,7 мм. Малое и постоянное значение перепада давления на дросселе уменьшает температурную погрешность и вариацию прямого и обратного ходов, так как мембраны при таком режиме работы усилителя на всем диапазоне выходного сигнала почти полностью разгружены.

Для местного индивидуального контроля давления питания и пневматического выходного сигнала преобразователя применяют показывающие миниатюрные манометры *10* (рис. 8-10-1) с верхним

пределом измерения 1,6 кгс/см² (0,16 МПа). Максимальное расстояние передачи пневматического сигнала по трассе не более 300 м.

Первичные приборы с пневматическим выходным сигналом 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа) могут работать в комплекте с любыми пневматическими показывающими и самопишущими вторичными приборами, выпускаемыми отечественными приборостроительными заводами. Кроме того, они могут работать совместно с функциональными и регулирующими блоками и другими устройствами систем пневмоавтоматики.

8-11. Пневматические передающие преобразователи

Пневматические передающие преобразователи, рассматриваемые ниже, предназначены для преобразования угла поворота выходной оси измерительных устройств, пропорционального сигналу измерительной информации, в унифицированный пневматический выходной сигнал, изменяющийся от 0,2 до 1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа). Преобразователи этого типа, изготовляемые в виде отдель-

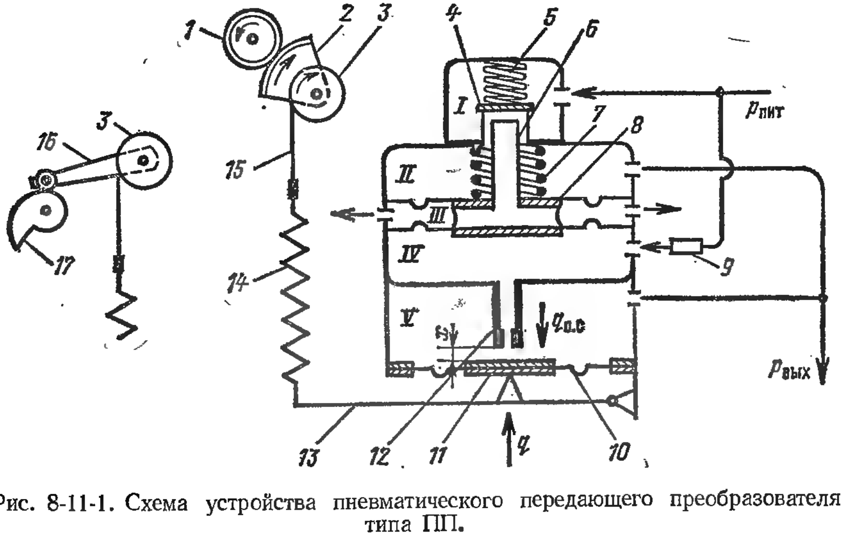


Рис. 8-11-1. Схема устройства пневматического передающего преобразователя типа ПП.

ного блока (или узла), устанавливаются как дополнительное устройство в различных средствах измерений, например в манометрических термометрах, в приборах для измерения давления, в дифманометрах и в некоторых вторичных приборах.

На рис. 8-11-1 показана схема устройства пневматического передающего преобразователя типа ПП, изготовляемого Харьковским заводом КИП [17]. Входной величиной этого преобразователя является угол поворота. Преобразователь, устанавливаемый внутри прибора, связан с выходной осью его через сектор *2* посредством

шестерни *1* (или через поводок *16* с катящимся по кулачку *17* роликом). Шестерня (или кулачок), неподвижно укрепленная на выходной оси прибора, рассчитана таким образом, что при повороте ее на полный рабочий угол, соответствующий диапазону измерения прибора, входная ось преобразователя, а следовательно, и сектор *2* с роликом *3* (или поводок *16* с роликом *3*), повернется на угол 40°. Угол поворота сектора (или поводка) посредством ролика *3*, ленты *15* и винтовой пружины *14* преобразуется в пропорциональное усилие q на рычаге *13*. В пневматическом преобразователе сила q преобразуется в выходной пневматический сигнал $p_{вых}$.

Сжатый очищенный воздух через фильтр и редуктор из магистрали питания под давлением $p_{пит} = 1,4$ кгс/см² (0,014 МПа) поступает в камеру *I* и через постоянный дроссель *9* в камеру *IV*. Давление в этой камере определяется значением зазора x между соплом *12* и заслонкой *11*, которая одновременно является жестким центром мембраны обратной связи *10*. Размер зазора x является функцией усилия q, а следовательно, и измеряемой величины. На дросселе *9* поддерживается постоянный перепад давлений и его назначение аналогично назначению дросселя *9* унифицированного пневматического усилителя, показанного на рис. 8-10-2. Камера *III* снабжена отверстиями, через которые осуществляется сброс воздуха в атмосферу.

Выходной пневматический сигнал $p_{вых}$ формируется в камере *II*, в которую воздух поступает из камеры *I* через пластинчатый клапан *4*, связанный с мембранным блоком *8* с помощью полого штока *6*. В положении, показанном на рис. 8-11-1, пластинчатый клапан закрыт усилием пружины *5*, а камера *II* через полый шток и камеру *III* соединена с атмосферой. В этом случае входное усилие q мало и соответственно невелики давление в камере *IV* и сопротивление на выходе из сопла *12*. Поэтому усилие, действующее на мембранный блок со стороны камеры *IV*, меньше, чем усилие, создаваемое пружиной *7*.

При возрастании усилия q на рычаге *13* пропорционально углу поворота входной оси зазор x будет уменьшаться, и вместе с тем будет увеличиваться сопротивление на выходе из сопла. С ростом сопротивления на сопле будет соответственно увеличиваться давление воздуха в камере *IV*. При повышении давления в камере *IV* нарушается равновесие сил, действующих на мембранный блок, и полый шток перемещается вверх. Шток воздействует на пластинчатый клапан, который, открываясь, будет пропускать через кольцевой канал воздух из камеры *I* в камеру *II* и далее в линию выходного давления $p_{вых}$. Из линии выходного давления воздух подается в камеру обратной связи *V*. При повышении давления воздуха в камере *V* мембрана обратной связи *10* развивает усилие $q_{о.с}$, уравновешивающее усилие q при определенном значении зазора x, а вместе с тем и выходного сигнала $p_{вых}$. Автоматическое поддержание выходного давления $p_{вых}$ достигается при

динамическом равновесии мембранного блока: полый шток и пластинчатый клапан находятся в режиме высокочастотных незатухающих колебаний.

Пределы допускаемой основной погрешности пневматического преобразователя типа ПП не превышают ± 1%. Изменение выходного сигнала преобразователя, вызываемое изменением давления питания $p_{пит}$ на ± 10% номинального значения 1,4 кгс/см² (0,14 МПа) не превышает половины абсолютного значения основной погрешности (0,5%). Изменение выходного сигнала преобразователя в процентах, вызываемое изменением температуры окружающего воздуха от 20 ± 5°C до любой температуры в пределах от 5 до 50°C на каждые 10°C, не превышает

$$\delta = \pm (x_{н.с} + 0{,}025 \Delta t), \qquad (8\text{-}11\text{-}1)$$

где $x_{н.с}$ — значение допускаемого непостоянства выходного сигнала ($x_{н.с} = 0{,}5\%$); Δt — абсолютное значение разности температур, °C; 0,025 — температурный коэффициент, $(\%) \cdot {}^\circ C^{-1}$.

Рассмотренные пневматические передающие преобразователи типа ПП устанавливаются в качестве дополнительного устройства в первичных приборах (например, типов МАФ и МКФ) и во вторичных приборах типов ВФС, ВФП, КСП-3, КСМ-3, КСД-3 и др.

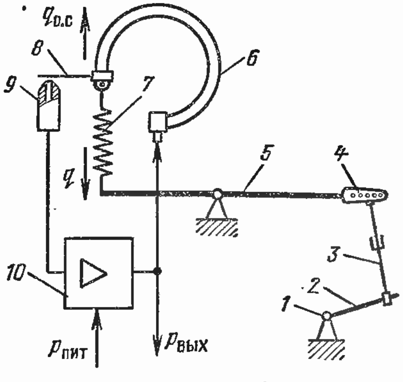


Рис. 8-11-2. Схема устройства пневматического передающего преобразователя.

Пневматический передающий преобразователь со схемой, показанной на рис. 8-11-2, устанавливается в качестве дополнительного устройства в манометрических термометрах, выпускаемых казанским заводом «Теплоконтроль». В основу построения этого пневматического передающего преобразователя положен принцип силовой компенсации.

Угол поворота выходной оси *1* прибора посредством тяги *2*, поводков *3* и *4*, рычага *5* и цилиндрической пружины *7* передается на свободный конец манометрической пружины *6* устройства обратной связи. При повороте оси *1* свободный конец манометрической пружины, перемещаясь под действием усилия *q*, развиваемого пружиной *7*, уменьшает или увеличивает зазор между заслонкой *8* и соплом *9* узла индикатора рассогласования. Индикатор рассогласования преобразует это перемещение в управляющий сигнал давления сжатого воздуха. Повышение (или понижение) давления в линии сопла приводит к изменению выходного сигнала давления $p_{вых}$ пневматического усилителя мощности *10*. Выходной сигнал давления $p_{вых}$ пневматического усилителя поступает в линию

дистанционной передачи и одновременно в манометрическую пружину устройства обратной связи, где преобразуется в пропорциональное усилие обратной связи $q_{о.с}$, которое уравновешивает усилие q, создаваемое цилиндрической пружиной.

Мерой усилия q, а следовательно, и измеряемой величины является текущее значение выходного сигнала давления $p_{вых}$ преобразователя, изменяющееся в пределах от 0,2 до 1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа).

Заслонка индикатора рассогласования имеет максимальный рабочий ход примерно 0,01 мм.

Пневматический преобразователь снабжен корректором нуля, с помощью которого устанавливается начальное значение выходного сигнала 0,2 кгс/см² (0,02 МПа) при нулевом значении измеряемой величины (корректор нуля на рис. 8-11-2 не показан).

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей пневматических передающих преобразователей нормируются в зависимости от типа и класса точности манометрического термометра.

В основу построения пневматических передающих преобразователей для преобразования угла поворота оси манометров, дифманометров типа ДП, ДСП и других приборов в унифицированный пневматический выходной сигнал положен также принцип силовой компенсации. В устройстве обратной связи используется сильфон, а индикатор рассогласования выполняется по типу сопло-заслонка. Пневматический усилитель выполняется по схеме, показанной на рис. 8-10-2. Приборы, снабженные рассмотренным пневматическим передающим преобразователем, могут работать в комплекте с вторичными приборами и с другими устройствами систем пневматики, указанными выше.

8-12. Электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи

При создании комбинированных электропневматических систем автоматического контроля, регулирования и управления применяют для получения непрерывных сигналов измерительной информации приборы с электрическими и пневматическими выходными сигналами. В этом случае для согласования рода энергии сигналов возникает необходимость применения электропневматических преобразователей для преобразования электрических сигналов постоянного тока в пневматический выходной сигнал. Для преобразования пневматических сигналов измерительной информации средств измерений в электрический выходной сигнал используются пневмоэлектрические преобразователи.

Электропневматические преобразователи. Рассмотрим в качестве примера устройство малогабаритного электропневматического преобразователя типа ЭПП-М. Этот преобразователь предназначен для пропорционального преобразования непрерывного элек-

трического сигнала постоянного тока 0—5 мА в унифицированный пневматический сигнал 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа).

Принципиальная схема электропневматического преобразователя типа ЭПП-М изображена на рис. 8-12-1. Входным устройством служит магнитоэлектрический силовой механизм, состоящий из магнитопровода *2*, постоянного магнита *1* и рамки *3*, укрепленной на рычаге *4* с точкой опоры *5*. Индикатор рассогласования состоит из сопла *6* и шарика *7*, контакт которого с соплом осуществляется по острой кромке. Устройство обратной связи *8* представляет собой силовой элемент типа сопло-шарик. Сопло имеет развитую цилиндрическую часть, и поэтому шарик работает как поршень. Пневматический усилитель *9* выполнен по схеме, показанной на рис. 8-10-2.

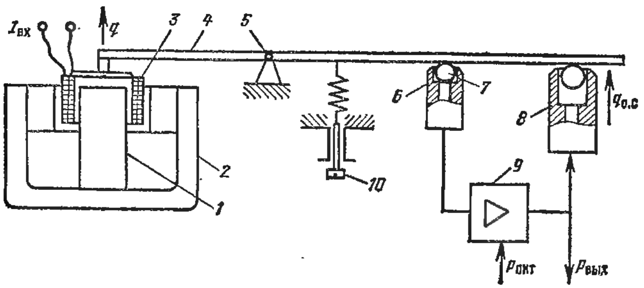


Рис. 8-12-1. Принципиальная схема устройства электропневматического преобразователя типа ЭПП-М.

Перемещение силового элемента обратной связи вдоль рычага обеспечивает перестройку диапазона преобразователя на ±50%. Начало диапазона преобразования при нулевом входном сигнале $I_{вх}$ устанавливается с помощью пружины-корректора нуля *10*.

Класс точности преобразователя ЭПП-М 0,6. Входное сопротивление не более 2,0 кОм. Изменение выходного сигнала преобразователя, вызываемое изменением температуры окружающего воздуха от 20 ± 5°С до любой температуры от 5 до 50°С на каждые 10°С, не превышает значения, определяемого по формуле (8-11-1) при $x_{н.с} = 0{,}3\%$. Изменение выходного сигнала преобразователя, вызываемое изменением давления питания на ±10% номинального значения 1,4 кгс/см² (0,14 МПа), не превышает половины абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности.

Изменение выходного сигнала преобразователя, вызываемое влиянием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м, образованного как переменным током частотой 50 Гц, так и постоянным током при любом направлении поля, не превышает основной погрешности.

Приборостроительной промышленностью выпускаются и другие типы электропневматических преобразователей с силовой компенсацией.

Пневмоэлектрические преобразователи. Пневмоэлектрические преобразователи для непрерывных входных и выходных сигналов могут быть выполнены как преобразователи прямого действия и как преобразователи компенсационного типа, использующие дополнительный источник энергии. Преобразователи прямого действия обладают меньшей точностью по сравнению с преобразователями компенсационного типа, однако стоимость преобразователей компенсационного типа выше, чем прямого действия.

На рис. 8-12-2 приведена схема устройства пневмоэлектрического преобразователя прямого действия типа ППЭ-6. Он предназначен для пропорционального преобразования непрерывного пневматического сигнала 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа) в электрический сигнал.

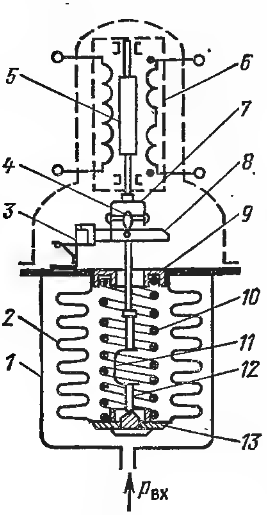


Рис. 8-12-2. Схема устройства пневмоэлектрического преобразователя прямого действия типа ППЭ-6.

Преобразователь состоит из двух основных элементов: измерительного блока *1*, воспринимающего входной пневматический сигнал $p_{вх}$, и дифференциально-трансформаторного передающего преобразователя *6* (§ 8-4), преобразующего входное давление $p_{вх}$ в электрический выходной сигнал. В измерительном блоке в качестве упругого чувствительного элемента используется сильфон *2*, снабженный винтовой пружиной *10*. Пружина нижним концом закреплена во втулке *13*, а верхним — во втулке *9*, которая одновременно служит для центрирования и регулирования пружины.

С дном сильфона связан шток *12*, верхний конец которого соединен с рычагом *8*. Осью рычага является упругий шарнир *3*. При повороте рычага перемещается ролик *4*, который закреплен на скобе *7*, соединенной со штоком сердечника *5* дифференциально-трансформаторного преобразователя. Для уменьшения температурной погрешности шток сильфона снабжен биметаллическим компенсатором *11*. Для удобства наладки преобразователя предусмотрена возможность регулировки длины штоком сильфона и сердечника.

Пневматический сигнал измерительной информации $p_{вх}$ первичного прибора подводится к пневмоэлектрическому преобразователю через штуцер в герметически закрытый кожухом измерительный блок *1*. Под действием давления сильфон сжимается, что вызывает пропорциональное перемещение штоков, а следовательно, и сердечника дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Основная погрешность преобразователя ППЭ-6, выраженная в процентах от максимального хода сердечника, не превышает ±1%. Максимальное значение хода сердечника составляет 5 мм.

Рассмотренный пневмоэлектрический преобразователь ППЭ-6 работает в комплекте с вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы типа КПД1, КСД2 и др. Измерительные схемы дистанционной передачи с использованием дифференциально-трансформаторных преобразователей рассмотрены в § 8-4.

В основу построения пневмоэлектрических преобразователей компенсационного типа положен принцип компенсации усилий. Преобразователи этого типа представляют собой измерительные устройства с отрицательной обратной связью, аналогичные рассмотренным выше.

8-13. Нормирующие измерительные преобразователи

Нормирующие измерительные преобразователи предназначены для преобразования выходного сигнала первичных преобразователей (стандартных термоэлектрических термометров и термометров сопротивления) и выходного сигнала переменного тока измерительных устройств (дифманометров, манометров и других приборов) в унифицированный сигнал постоянного тока. Нормирующие преобразователи, применяемые для преобразования выходного сигнала первичных преобразователей, называют также промежуточными.

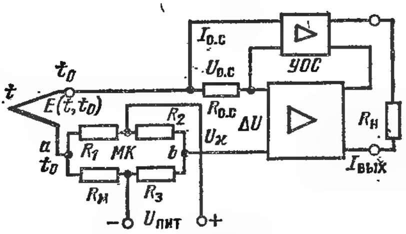


Рис. 8-13-1. Упрощенная схема нормирующего преобразователя типа ПТ-ТП-68.

Преобразователи для работы в комплекте с термоэлектрическими термометрами. Рассмотрим нормирующий преобразователь ПТ-ТП-68, разработанный ВТИ совместно с московским опытным заводом «Энергоприбор».

На рис. 8-13-1 показана упрощенная схема нормирующего преобразователя типа ПТ-ТП-68 для линейного преобразования термо-э. д. с. термометра $E(t, t_0)$ в сигнал постоянного тока 0—5 мА при сопротивлении внешней нагрузки $R_н = 2{,}5$ кОм. Преобразователь состоит из корректирующего моста *МК*, усилителя с токовым выходом $I_{вых}$, устройства обратной связи, состоящего из усилителя обратной связи *УОС* и резистора $R_{о.с}$. Резисторы корректирующего моста *МК* R_1, R_2 и R_3 выполнены из манганина, а резистор $R_м$, который обычно располагают в непосредственной близости от свободных концов термоэлектродных проводов, — из меди.

Преобразователь типа ПТ-ТП-68 выполнен по статической автокомпенсационной схеме. Входной сигнал термоэлектрического термометра, скорректированный напряжением U_{ab}, снимаемым с вершин моста *ab* [$U_x = E(t, t_0) + U_{ab}$], сравнивается с напряжением обратной связи $U_{о.с}$. Нескомпенсированный сигнал $\Delta U = U_x - U_{о.с}$ усиливается усилителем с токовым выходом. Выходной

ток $I_{\text{вых}}$ поступает во внешнюю цепь $R_{\text{н}}$ и через делитель (на рис. 8-13-1 делитель не показан) подается в усилитель *УОС* устройства обратной связи. Токи на выходе и входе усилителя устройства обратной связи строго пропорциональны между собой. Выходной ток усилителя обратной связи $I_{\text{о.с}}$ создает на резисторе $R_{\text{о.с}}$ сигнал обратной связи

$$U_{\text{о.с}} = I_{\text{о.с}} R_{\text{о.с}} = k_{\text{о.с}} R_{\text{о.с}} I_{\text{вых}},$$

где $k_{\text{о.с}}$ — коэффициент передачи *УОС*.

Для усилителя с обратной связью

$$\Delta I_{\text{вых}} = k_{\text{у}} (\Delta U_x - k_{\text{о.с}} R_{\text{о.с}} \Delta I_{\text{вых}}), \tag{8-13-1}$$

откуда

$$\Delta I_{\text{вых}} = \frac{k_{\text{у}}}{1 + k_{\text{у}} k_{\text{о.с}} R_{\text{о.с}}} \Delta U_x = k \Delta U_x, \tag{8-13-2}$$

где k — коэффициент передачи преобразователя.

При большом коэффициенте передачи усилителя ($k_{\text{у}} \to \infty$) коэффициент передачи преобразователя равен $k = 1/k_{\text{о.с}} R_{\text{о.с}}$, а его стабильность определяется стабильностью $k_{\text{о.с}}$ и $R_{\text{о.с}}$.

Принципиальная электрическая схема нормирующего преобразователя типа ПТ-ТП-68 представлена на рис. 8-13-2. Преобразователь состоит из следующих узлов: корректирующего моста *МК*, усилителя постоянного тока, устройства обратной связи УМ-2 и $R_{\text{о. с}}$ и силового трансформатора *Тр*.

Корректирующий мост *МК* служит для автоматического введения поправки на изменение термо-э. д. с. термометра, вызываемого изменением температуры свободных его концов t_0 и компенсации (подавления) начальной термо-э. д. с. термометра в преобразователях с безнулевым началом преобразования входного сигнала. Мост состоит из двух балластных и двух активных плеч. Балластные плечи моста содержат манганиновые резисторы R_{11} и R_{12}. Первое активное плечо имеет четыре манганиновых постоянных резистора и один регулируемый R_8 — «корректор нуля». С помощью резисторов R_9^*, R_{10} подбирается необходимое напряжение на вершинах моста $U_{\text{н. к}}$ для компенсации начальной термо-э. д. с. термометра в преобразователях с безнулевым началом преобразования. Резисторы R_6, R_7 определяют диапазон действия корректора нуля R_8. Другое активное плечо включает в себя в рабочем состоянии медный резистор R_2 для получения корректирующего напряжения U_{ab} на вершинах моста при изменении термо-э. д. с. термометра, вызванном изменением температуры свободных концов термоэлектродных проводов. Включенные в это плечо манганиновые резисторы R_3^* и R_4 определяют необходимое влияние медного резистора R_2 на U_{ab}. В режиме контроля и при проверке преобразователя вместо медного резистора R_2 подключается контрольный манганиновый резистор R_5. Номинальное значение сопротивления резистора R_5 равно сопротивлению R_2 при 0°C. Номинальное расчетное значение сопротивления R_2 соответствует температуре 30° С. Для обеспечения большей точности суммарное сопротивление термоэлектрического термометра, термоэлектродных проводов, соединяющих термометр с преобразователем, и подгоночной катушки R_1 должно составлять 75 Ом.

Питание моста осуществляется от стабилизированного источника (обмотка *IV* силового трансформатора *Тр*, диод $Д_7$, конденсатор C_1, стабилитроны $Д_1$, $Д_2$ с ограничивающими их ток резисторами R_{16} и R_{17}).

Значение тока питания моста устанавливается манганиновым резистором R_{14}^* и медным R_{15}, осуществляющим компенсацию температурного изменения напряжения стабилизации стабилитрона $Д_1$.

Усилитель преобразователя состоит из двух каскадов: магнитного УМ-1 и полупроводникового, выполненного иа одном кремниевом транзисторе T_1. Магнитный усилитель УМ-1 выполнен по двухтактной двухполупериодной схеме

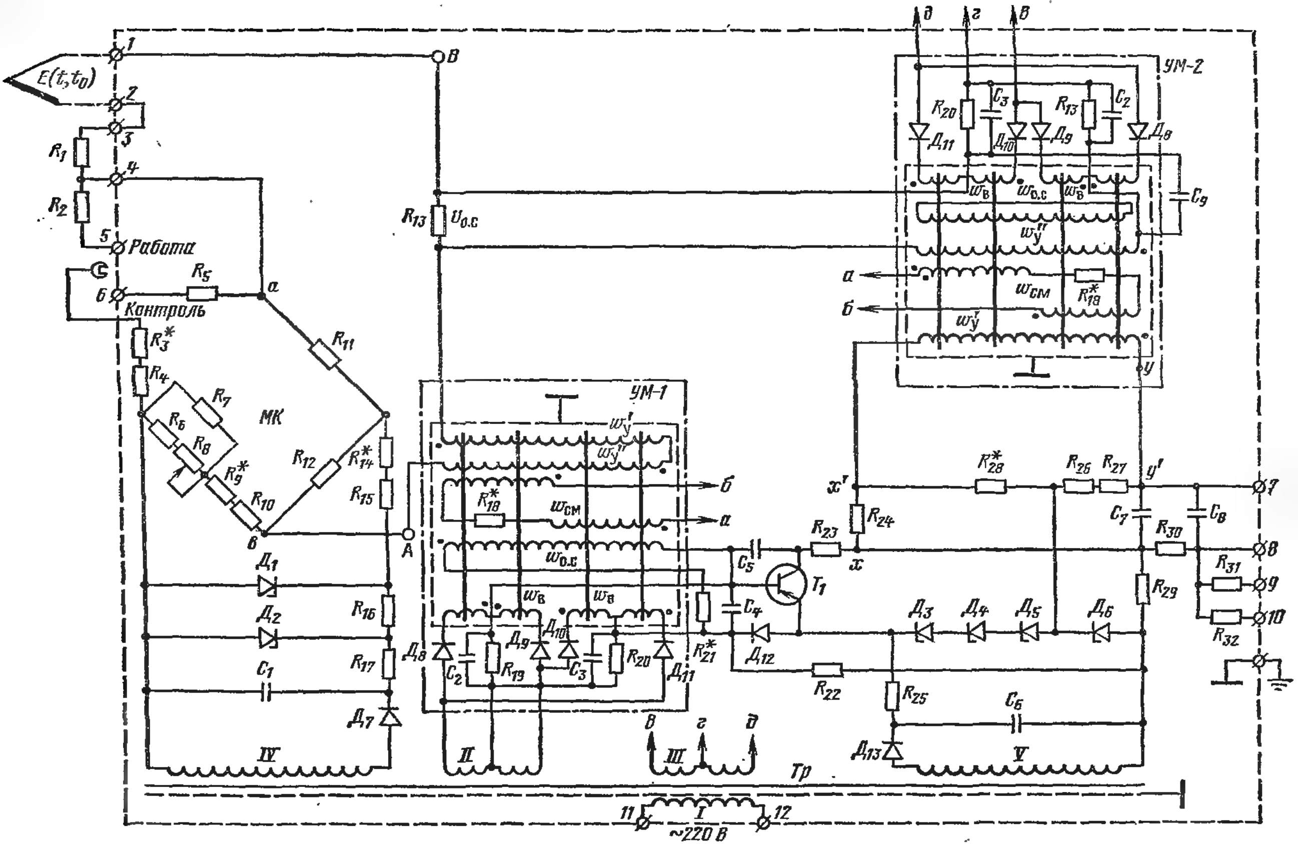


Рис. 8-13-2. Электрическая схема нормирующего преобразователя типа ПТ-ТП-68.

с глубоким насыщением. Резистор R_{18}^{*}, включенный в обмотки смещения $w_{см}$, служит для установления тока смещения магнитного усилителя. Управляющие обмотки усилителя $w'_{у}$ и $w''_{у}$ соединены последовательно. Вспомогательная обмотка обратной связи $w_{о.с}$ через резистор R_{21}^{*} образует положительную обратную связь, увеличивая коэффициент передачи усилителя. Следует отметить, что магнитный усилитель обеспечивает гальваническое разделение в прямом тракте преобразователя.

Выходной сигнал магнитного усилителя снимается в виде разности напряжений с двух манганиновых резисторов R_{19} и R_{20}, включенных в обмотки возбуждения $w_{в}$. Конденсаторы C_2 и C_3 увеличивают коэффициент усиления усилителя УМ-1. Конденсатор C_4 служит для сглаживания пульсаций выходного сигнала магнитного усилителя.

Транзисторный каскад работает в режиме усиления постоянного тока. Начальный режим транзистора и температурная стабилизация режима обеспечивается подачей смещения на базу от делителя, образованного резистором R_{22} и кремниевым диодом $Д_{12}$, питающимся стабилизированным напряжением от стабилитронов $Д_3$—$Д_6$. Изменение температуры окружающего воздуха равным образом смещает характеристики диода и транзистора, что обеспечивает необходимую компенсацию. В коллекторную цепь включен балластный резистор R_{23}. Этот резистор создает условия для эффективного введения отрицательной обратной связи (по переменному току) через конденсатор C_5, соединяющий коллектор с базой, и образует фильтр, способствующий уменьшению пульсаций выходного тока, проникающих от магнитного усилителя. Для компенсации начального тока полупроводникового усилителя предусмотрена подпитка выходной цепи его обратным током через резистор R_{29}. В целях уменьшения погрешности от изменения сопротивления внешней нагрузки преобразователя через резистор R_{24} введена положительная обратная связь по напряжению на нагрузке.

На выходе преобразователя выходной ток окончательно фильтруется с помощью фильтра, состоящего из конденсаторов C_7, C_8 и резистора R_{30}. Резисторы $R_{31} = 1$ кОм и $R_{32} = 2$ кОм используются как часть нагрузки в тех случаях, когда суммарное сопротивление реальной внешней нагрузки преобразователя меньше 2 или 1 кОм соответственно. Для обеспечения большей точности сопротивление внешней нагрузки должно быть равным 2,5 кОм.

Устройство обратной связи (рис. 8-13-2) состоит из магнитного усилителя обратной связи УМ-2 с делителем и резистора обратной связи R_{13}. К усилителю обратной связи входной сигнал подается через делитель в цепи выходного тока преобразователя. Медный резистор делителя R_{27} предназначен для устранения систематической температурной погрешности, возникающей вследствие изменения сопротивления обмотки управления $w'_{у}$ при изменении температуры окружающего воздуха. Манганиновые резисторы делителя R_{26} и R_{28}^{*} устанавливают оптимальный режим работы усилителя обратной связи. Усилитель обратной связи аналогичен усилителю УМ-1, но включен с глубокой отрицательной обратной связью по току, осуществляемой включением обмотки $w''_{у}$ в цепь выходного тока усилителя. Нагрузкой этого усилителя является резистор обратной связи R_{13}. Конденсатор C_9 в усилителе УМ-2 служит для сглаживания пульсации выходного тока. Усилитель УМ-2 осуществляет гальваническое разделение в цепи обратной связи.

Питание преобразователя осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц через силовой трансформатор *Тр*, имеющий четыре вторичных обмотки.

В зависимости от диапазона входного сигнала преобразователи ПТ-ТП-68, предназначенные для работы с термоэлектрическими термометрами типа ТПП, ТХК, ТХА, изготовляются следующих классов точности: 0,6 — для диапазона 30—50 мВ; 1,0 — для диапазона 18—30 мВ; 1,5 — для диапазона 6—18 мВ.

Преобразователи для работы в комплекте с термометрами сопротивления. Упрощенная схема нормирующего преобразователя для линейного преобразования сопротивления термометра $R_т$ в унифи-

цированный сигнал постоянного тока 0—5 мА представлена на рис. 8-13-3. Преобразователь, выполненный по статической автокомпенсационной схеме, состоит из измерительного моста *МИ*, усилителя с токовым выходом $I_{вых}$, устройства отрицательной обратной связи, включающего усилитель *УОС* и резистор $R_{о.с}$. Измерительный мост, работающий в неравновесном режиме, предназначен для преобразования изменения сопротивления термометра $R_т$ в напряжение постоянного тока $U_м$, снимаемое с вершин *ab*. Питание схемы моста осуществляется от стабилизированного источника. Балластные резисторы плеч моста R_1, R_2 и R_3 выполнены из манганина. Термометр сопротивления $R_т$ присоединен к измерительному мосту по трехпроводной схеме.

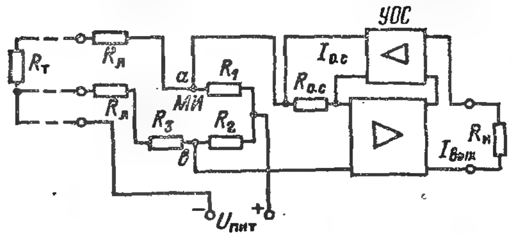


Рис. 8-13-3. Упрощенная схема нормирующего преобразователя типа ПТ-ТС-68.

Принципиальная электрическая схема усилителя с токовым выходом и усилителя устройства обратной связи преобразователя типа ПТ-ТС-68 в основном аналогична схеме преобразователя типа ПТ-ТП-68. Отличается она только тем, что в усилителе преобразователя ПТ-ТС-68 резистор R_{24} отсутствует, и цепь между точками x и x' разомкнута, а манганиновый резистор R^*_{23} включен в цепь обмотки управления $w'_у$ усилителя УМ-2 между точками y и y' (см. рис. 8-13-2).

Электрическая схема измерительного моста нормирующего преобразователя типа ПТ-ТС-68, подключаемая

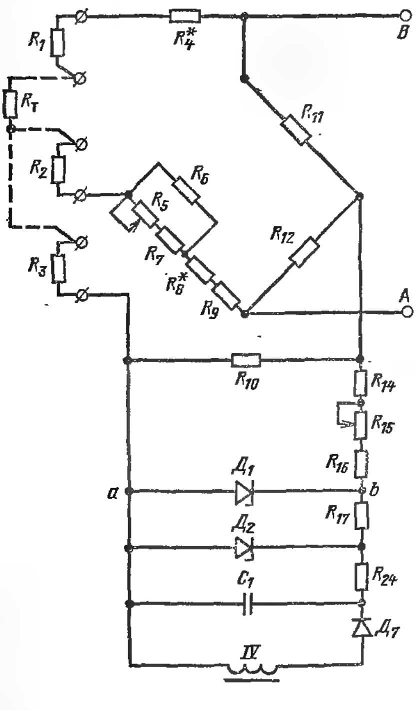


Рис. 8-13-4. Электрическая схема измерительного моста нормирующего преобразователя типа ПТ-ТС-68.

к точкам *А* и *В* усилителя УМ-1 и устройства обратной связи (рис. 8-13-2), показана на рис. 8-13-4. Мост состоит из двух балластных и двух активных плеч. Балластные плечи моста образованы манганиновыми резисторами R_{11} и R_{12}.

Одно из активных плеч имеет четыре постоянных манганиновых резистора R_6, R_7, R^*_8, R_9 и один регулируемый R_5 — «корректор нуля». Резисторы R_6 и R_7 определяют диапазон действия корректора нуля R_5. Второе активное плечо содер-

жит термометр сопротивления $R_т$ и резисторы R_1 и R_4^*. С помощью резисторов R_4^*, R_8^* и R_9 осуществляется начальное смещение нуля.

Сопротивление каждого провода, соединяющего термометр $R_т$ с преобразователем, подгоняется с помощью катушек R_1, R_2 и R_3 до заданного значения $R_л = 5$ Ом.

Питание измерительного моста осуществляется от стабилизированного источника (обмотка *IV* силового трансформатора, диод $Д_7$, конденсатор C_1, стабилитроны $Д_1$, $Д_2$ с ограничивающими их ток резисторами R_{17} и R_{24}). Значение тока питания моста устанавливается резисторами R_{10}, R_{14}, R_{15}, R_{16}. При этом медный резистор R_{16} осуществляет компенсацию температурного изменения напряжения стабилизации стабилитрона $Д_1$.

Класс точности преобразователей ПТ-ТС-68—0,6. Подробные технические характеристики преобразователей ПТ-ТС-68 и ПТ-ТП-68 приведены в заводской инструкции по эксплуатации.

Преобразователи напряжения переменного тока в постоянный ток. Выше отмечалось, что передача сигнала измерительной информации постоянным током по сравнению с переменным имеет существенное преимущество при автоматизации технологических процессов и особенно при применении информационно-вычислительных машин. В соответствии с этим с целью использования в автоматизированных системах управления некоторых широко применяемых первичных и других приборов с выходным сигналом переменного тока были созданы в качестве дополнительных блоков нормирующие преобразователи для преобразования сигнала измерительной информации этих приборов в унифицированный сигнал постоянного тока. Это позволяет осуществлять связь измерительных устройств с выходным сигналом переменного тока с вторичными приборами постоянного тока, измерительными блоками регуляторов и информационно-вычислительными машинами.

Однако применение в измерительных цепях дополнительных нормирующих преобразователей увеличивает погрешность и уменьшает надежность измерительной системы. Поэтому при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами на ТЭС, АЭС и других отраслях промышленности необходимо применять измерительные устройства с выходными сигналами, не требующие использования дополнительных преобразователей для согласования рода энергии выходных и входных сигналов средств измерений.

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ

Широкое использование давления в научных исследованиях и в различных отраслях промышленности вызывает необходимость применения большого числа средств измерения давления и разности давлений, различных по принципу их действия, устройству, назначению и точности. При измерении давления нас могут интересовать абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления. Абсолютное давление необходимо знать в тех случаях, когда влияние атмосферного давления исключить нельзя, как, например, при изучении вопросов состояния рабочих тел, при определении температуры кипения различных жидкостей и в других подобных случаях.

При контроле технологических процессов и при проведении научных исследований в большинстве случаев приходится иметь дело с измерением избыточного и вакуумметрического давлений, а также с измерением разности давлений.

Под термином абсолютное давление подразумевается полное давление, под которым находится жидкость, газ или пар. Оно равно сумме давлений избыточного $p_и$ и атмосферного $p_а$:

$$p = p_и + p_а.$$

Из этого уравнения

$$p_и = p - p_а,$$

т. е. избыточное давление равно разности между абсолютным давлением, большим атмосферного, и атмосферным давлением.

Под термином вакуумметрическое давление (разрежение или вакуум) подразумевается разность между атмосферным давлением и абсолютным давлением, меньшим атмосферного:

$$p_в = p_а - p.$$

Прибор, измеряющий атмосферное давление, называют барометром, отсюда атмосферное давление — барометрическим. Прибор, предназначенный для измерения абсолютного давления, называют манометром абсолютного давления. Прибор, измеряющий избыточное или вакуумметрическое давление, — соответственно манометром избыточного давления и вакуумметром. Прибор, измеряющий малое избыточное давление (например, давление воздуха, подаваемого в топку котла) и разрежение газа (например, в газоходе котла), называется соответственно напоромером и тяго-

мером. Прибор, предназначенный для измерения вакуумметрического и избыточного давлений, называют мановакуумметром, а для измерения малых давлений и разрежений газа (например, в топке котла) — тягонапоромером. Прибор, измеряющий очень малые давления (ниже и выше барометрического) и незначительные разности давлений, называют микроманометром; прибор, предназначенный для измерения разности давлений, — дифференциальным манометром (дифманометром).

Единицы давления. Из числа допускаемых к применению в СССР единиц давления предпочтительной является единица международной системы (СИ) паскаль (Па). Паскаль — давление силы в один ньютон на площадь в один квадратный метр (Н/м²). При применении этой единицы давления могут использоваться приставки, установленные ГОСТ 7663-55, для образования наименований кратных и дольных единиц лишь для выражения значения давления, полученного как окончательное в результате измерения или расчета, с целью сокращения числа значащих цифр в записываемом числе (например, 2,94 МПа вместо 2 940 000 Па).

Для применения допускаются также единица давления системы МКГСС килограмм-сила на квадратный метр ($кгс \cdot м^{-2}$) и внесистемные единицы давления: килограмм-сила на квадратный сантиметр ($кгс \cdot см^{-2}$), которую часто называют технической атмосферой (ат), миллиметр водяного столба (мм вод. ст.) и миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.). При измерении давления жидкостным столбом последний должен быть отнесен для воды к 4°С, ртути — к 0°С и нормальному ускорению свободного падения, равному $9{,}80665\ м \cdot с^{-2}$.

Применение единицы давления миллиметр водяного (или ртутного) столба особенно удобно в тех случаях, когда пользуются техническими жидкостными приборами с видимым мениском (гл. 9). Следует также отметить, что в настоящее время в СССР выпускаемые приборы для измерения давления и разности давлений (гл. 10—12) градуируются в единицах давления килограмм-сила на квадратный метр (или сантиметр).

Кроме указанных выше единиц давления применяют физическую атмосферу, равную нормальному давлению атмосферного воздуха 760 мм рт. ст. при 0°С и нормальном ускорении свободного падения (760 мм рт. ст. = 101,325 кПа = $1{,}0332\ кгс \cdot см^{-2}$).

В физической и технической литературе до введения единицы давления системы СИ пользовались единицей давления системы СГС: дина на квадратный сантиметр ($1\ дин \cdot см^{-2} = 0{,}1$ Па) и внесистемной единицей давления бар ($1\ бар = 10^5\ Па = 10{,}197 \cdot 10^3\ кгс \cdot м^{-2} = 1{,}0197\ кгс \cdot см^{-2}$). В настоящее время эти единицы давления не рекомендуются к применению.

В английской системе мер за единицу давления принимают давление в один английский фунт (0,4536 кгс) на площадь в один квадратный дюйм (6,452 см²).

$$\left(1\,\frac{англ.\ фунт}{кв.\ дюйм} = 6{,}89 \cdot 10^3\ Па = 703\ кгс \cdot м^{-2} = 70{,}3 \cdot 10^{-3}\ кгс \cdot м^{-2}\right).$$

Соотношения между применяемыми единицами давления приведены в табл. 9-1.

Таблица 9-1

Соотношение между единицами давления

Единицы	Па	кгс · м$^{-2}$	кгс · см$^{-2}$	мм вод.ст.	мм рт. ст.
1 Па	1	0,10197	10,197 · 10^{-6}	0,101197	7,50 · 10^{-3}
1 кгс · м$^{-2}$	9,80665	1	10^{-4}	1	73,56 · 10^{-3}
1 кгс · см$^{-2}$	98,0665 · 10^{3}	10^{4}	1	10^{4}	735,56
1 мм вод. ст	9,80665	1	10^{-4}	1	73,56 · 10^{-3}
1 мм рт. ст.	133,322	13,595	13,595 · 10^{-4}	13,595	1

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ЖИДКОСТНЫЕ ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ С ВИДИМЫМ УРОВНЕМ

9-1. Приборы U-образные и чашечные

Приборы U-образные (двухтрубные) и чашечные (однотрубные) относятся к группе жидкостных приборов с видимым уровнем. Они применяются в качестве манометров (напоромеров) для измерения избыточного давления воздуха и неагрессивных газов до 700 мм вод. ст. (7000 Па) и 735 мм рт. ст. (0,1 МПа), тягомеров для измерения разрежения газовых сред до 700 мм вод. ст. (7000 Па), вакуумметров для измерения вакуума (разрежения) до 760 мм рт. ст. (0,101 МПа) и дифференциальных манометров для измерения разности давлений неагрессивных газов, находящихся под давлением, близким к атмосферному, до 700 мм вод. ст. (7000 Па) и неагрессивных жидкостей, газов и паров, находящихся под давлением более 1 кгс/см^2 (0,1 МПа), до 700 мм рт. ст. (0,09 МПа).

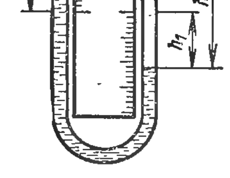


Рис. 9-1-1. Схема U-образного (двухтрубного) манометра.

Приборы U-образные и чашечные используются в промышленности как местные приборы, т. е. они устанавливаются на площадках обслуживания или на отдельных элементах технологического оборудования. Приборы этого типа применяют в качестве контрольных и образцовых манометров и вакуумметров для поверки рабочих приборов, рассчитанных на те же диапазоны измерения давления, разрежения или разности давлений.

На рис. 9-1-1 показана схема U-образного (двухтрубного) манометра. Он состоит из U-образной стеклянной трубки, заполняемой примерно до половины своей высоты рабочей жидкостью,

и шкалы, позволяющей производить отсчет уровней в обоих коленах. Измеряемое давление, разрежение или разность давлений уравновешивается и измеряется столбом h рабочей жидкости, определяемым как сумма столбов h_1 и h_2 в обоих коленах. При этом устраняется погрешность из-за некоторого возможного различия сечений обоих колен U-образной трубки.

В качестве рабочей жидкости обычно применяют воду или ртуть, а иногда и другие жидкости. Внутренний диаметр стеклянной трубки для изготовления U-образного прибора должен быть не менее 8—10 мм и по возможности одинаков по всей ее длине. При малом диаметре трубки капиллярные свойства воды не позволяют применять ее в качестве рабочей жидкости в приборах этого типа. В этом случае в качестве рабочей жидкости рекомендуется применять спирт.

При применении U-образный манометр должен устанавливаться вертикально по отвесу.

Для измерения избыточного давления в объекте правое колено трубки прибора соединяют с объектом, а левое оставляют открытым (сообщенным с атмосферой); при измерении разрежения — левое колено прибора соединяют с объектом, а правое — оставляют открытым. При измерении разности давлений большее давление подводится к правому, а меньшее — к левому колену трубки прибора.

Обычно с помощью U-образного прибора давление, разрежение или разность давлений измеряют в миллиметрах водяного или ртутного столба. Результат измерения может быть выражен не в миллиметрах столба рабочей жидкости, а в паскалях по формуле

$$p = hg(\rho - \rho_c), \tag{9-1-1}$$

где g — местное ускорение свободного падения, м/с^2; h — разность уровней рабочей жидкости, м; ρ — плотность рабочей жидкости, кг/м^3; ρ_c — плотность среды над рабочей жидкостью, кг/м^3.

Если $\rho_c \leqslant \rho$, уравнение (9-1-1) принимает вид:

$$p = hg\rho. \tag{9-1-2}$$

Для перевода значения давления, выраженного в Па, в значение, выраженное в кгс/м^2, необходимо полученный результат умножить на 0,102.

Если отсчет высоты столба h рабочей жидкости по U-образному прибору производят невооруженным глазом, то при цене деления шкалы в 1 мм при отсчете в двух коленах пределы допускаемой основной погрешности измерения давления, разрежения или разности давлений не превышают $\pm$ 2 мм столба рабочей жидкости (при этом учитывается и погрешность самой шкалы). Значения плотности рабочих жидкостей, наиболее часто применяемых в этих приборах (вода, ртуть), могут быть взяты из таблиц с погрешностью, не превышающей 0,005%. При этом необходимо быть уверенным в чистоте взятых жидкостей. Таким образом, практи-

чески погрешность определения плотности рабочей жидкости настолько мала, что на точность измерения она влиять не может и относительная погрешность при измерении давления, разрежения или разности давлений U-образным прибором зависит в основном от высоты столба рабочей жидкости и точности его отсчета.

Для увеличения точности отсчета высоты столба рабочей жидкости U-образные приборы повышенной точности и образцовые снабжают зеркальной шкалой. Для приборов такого типа пределы допускаемой основной погрешности показаний не превышают ± 1 мм столба рабочей жидкости.

Чашечный (однотрубный) манометр, показанный на рис. 9-1-2, состоит из цилиндрического сосуда и сообщающейся с ним измерительной стеклянной трубки. При этом площадь сечения сосуда значительно больше, чем измерительной трубки. Рабочую жидкость (воду, ртуть или другую жидкость) заливают в широкий сосуд настолько, чтобы уровень ее в измерительной трубке находился против нулевой отметки шкалы. При измерении давления в объекте его соединяют с помощью трубки с сосудом прибора, а при измерении разрежения — с измерительной трубкой. При измерении разности давлений большее давление подается в сосуд, а меньшее — в измерительную трубку.

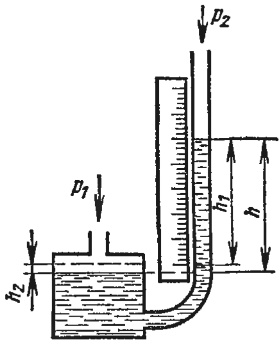


Рис. 9-1-2. Схема чашечного (однотрубного) манометра.

Пусть под действием давления, разрежения или разности давлений жидкость в измерительной трубке поднимется на высоту h_1, а в широком сосуде опустится на высоту h_2, тогда высота столба h, соответствующая измеряемой величине, будет равна:

$$h = h_1 + h_2. \tag{9-1-3}$$

Если F_1 — площадь сечения измерительной трубки, а F_2 — широкого сосуда, то

$$F_1 h_1 = F_2 h_2, \tag{9-1-4}$$

так как объем $F_1 h_1$ жидкости в измерительной трубке равен объему $F_2 h_2$ жидкости, вытесненной из широкого сосуда.

Решив уравнения (9-1-3) и (9-1-4) относительно h, получим:

$$h = h_1\left(1 + \frac{F_1}{F_2}\right) = h_1\left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right), \tag{9-1-5}$$

т. е. действительная высота столба h, соответствующая измеряемой величине, больше отсчитываемой высоты h_1 на значение $h_1 F_1/F_2$ или $h_1 d^2/D^2$, где d, D — внутренние диаметры измерительной трубки и широкого сосуда, м.

С помощью однотрубного манометра давление, разрежение или разность давлений обычно измеряют в миллиметрах столба рабочей

жидкости. В этом случае измеряемое давление определяют по формуле (9-1-5).

Если результаты измерения должны быть выражены не в миллиметрах столба рабочей жидкости, а в паскалях, то пользуются формулами (9-1-1), (9-1-2) и (9-1-5).

Основным достоинством чашечного прибора перед U-образным является то, что он позволяет производить только один отсчет. В этом случае при цене деления шкалы в 1 мм отсчет высоты столба в измерительной трубке может быть произведен с погрешностью, не превышающей ±1 мм столба рабочей жидкости. Так как при измерении давления, разрежения или разности давлений однотрубным прибором уровень жидкости в широком сосуде понижается, то необходимо вводить поправку в его показания или предварительно градуировать прибор в единицах давления с учетом этой поправки. Погрешностями самой шкалы и определения плотности рабочей жидкости можно пренебречь.

Если отношение $d^2/D^2 = 1/400$, то при повышении уровня рабочей жидкости в измерительной трубке на высоту h_1 в широком сосуде уровень жидкости понизится на 0,0025 этой высоты, т. е. на 0,25%, и погрешность измерения будет равна $\Delta + 0{,}0025h_1$, где Δ — погрешность отсчета столба рабочей жидкости h_1, мм столба рабочей жидкости.

Погрешностями определения плотности рабочей жидкости и измерения диаметров сосуда и трубки можно пренебречь вследствие их малости.

Пример. Измеренная высота столба $\widetilde{h}_1 = 700$ мм вод.ст., погрешность отсчета столба h_1 составит 1 мм вод.ст., погрешность за счет изменения уровня жидкости в сосуде равна $0{,}0025 \cdot 700 = 1{,}75 = 2$ мм вод.ст. Таким образом, погрешность измерения столба рабочей жидкости равна 3 мм вод. ст.

Для рабочих однотрубных манометров предел допускаемой основной погрешности не должен превышать ±3 мм столба рабочей жидкости. Однотрубные приборы с отношением $d^2/D^2 \geqslant 1/400$ могут иметь шкалу, градуированную в миллиметрах. В противном случае шкала прибора градуируется в единицах давления. Чашечные приборы, у которых в качестве рабочей жидкости используется спирт, имеют шкалу, градуированную в единицах давления.

При измерении малых давлений, разрежений или разностей давлений, выражающихся высотой столба рабочей жидкости в несколько десятков миллиметров, U-образные и чашечные приборы заменяют более точными приборами, называемыми микроманометрами.

Конструктивное оформление U-образных и чашечных приборов зависит главным образом от предельного допускаемого рабочего избыточного давления, на который рассчитаны приборы. В этом отношении U-образные и чашечные приборы можно разделить на четыре группы: для малого (до 0,5—1 кгс/см^2, или 0,05—0,1 МПа), низкого (до 5 кгс/см^2, или 0,5 МПа), среднего (до 50 кгс/см^2, или

5 МПа) и высокого давления (до 150 кгс/см^2 и выше, или 15 МПа и выше).

С конструктивным оформлением и техническими характеристиками приборов первой группы (манометров, тягомеров, тягонапоромеров и вакуумметров), а также второй, третьей и четвертой группы (дифференциальными манометрами) можно познакомиться в справочной литературе.

9-2. Микроманометры

Микроманометры являются переносными приборами, их применяют в лабораторной практике и в промышленных условиях при проведении испытаний теплосиловых и других установок для измерения малых давлений, разрежений или разностей давлений воздуха и неагрессивных газов. Приборы этого типа в зависимости от их назначения подразделяются на рабочие и образцовые микроманометры. Рабочие микроманометры в свою очередь подразделяются на приборы технические и повышенной точности.

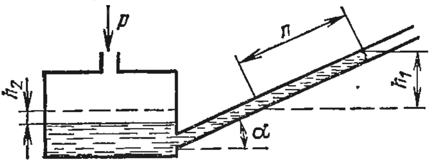


Рис. 9-2-1. Схема микроманометра с наклонной трубкой.

На рис. 9-2-1 показана схема микроманометра с наклонной стеклянной измерительной трубкой. Наклон измерительной трубки в этом приборе сделан с целью уменьшения погрешности измерений. В качестве рабочей жидкости в микроманометрах этого типа применяют этиловый спирт, который заливают в широкий сосуд настолько, чтобы уровень его в наклонной трубке находился против нулевой отметки шкалы. Длина шкалы у микроманометров с наклонной трубкой выполняется обычно равной 250 мм.

При измерении давления в каком-либо объекте к нему присоединяют с помощью трубки широкий сосуд прибора, а при измерении разрежения — наклонную трубку. В случае измерения разности давлений большее давление подается в сосуд, а меньшее — в измерительную трубку.

Пусть под действием измеряемого давления, разрежения или разности давлений воздуха уровень жидкости в трубке, наклоненной на угол α к горизонтальной плоскости, поднимется по вертикали на высоту h_1, в широком сосуде опустится на h_2, тогда разность высот уровней рабочей жидкости в приборе, уравновешивающая измеряемую величину, будет равна:

$$h = h_1 + h_2, \qquad (9\text{-}2\text{-}1)$$

где

$$h_1 = n \sin \alpha. \qquad (9\text{-}2\text{-}2)$$

Здесь n — длина столба жидкости в наклонной трубке.

Если F_1 и F_2 — соответственно площадь сечения наклонной трубки и сосуда, то

$$nF_1 = h_2 F_2, \tag{9-2-3}$$

т. е. объем nF жидкости, заключенный в наклонной трубке, равен объему h_2F_2 жидкости, вытесненной из широкого сосуда. Подставив в уравнение (9-2-1) h_1 и h_2 из уравнений (9-2-2) и (9-2-3), получим:

$$h = n\left(\sin\alpha + \frac{F_1}{F_2}\right).$$

Если ρ — плотность рабочей жидкости, кг/м^3; g — местное ускорение свободного падения, м/с^2, а h и n выражены в м, то значение измеряемого давления, Па, рассчитывают по формуле

$$p = hg\rho = ng\rho\left(\sin\alpha + \frac{F_1}{F_2}\right). \tag{9-2-4}$$

С помощью микроманометров давление, разрежение или разность давлений обычно измеряют в кгс/м^2. В этом случае уравнение (9-2-4) принимает вид:

$$p = 0{,}102ng\rho\left(\sin\alpha + \frac{F_1}{F_2}\right), \tag{9-2-5}$$

где 0,102— множитель для перевода значения давления, выраженного в Па, в значение, выраженное в кгс/м^2.

Если в уравнении (9-2-5) принять $0{,}102\,g = 1 \pm 0{,}001$, то получим:

$$p = n\rho\left(\sin\alpha + \frac{F_1}{F_2}\right) = nk, \tag{9-2-6}$$

где n — отсчет по шкале прибора, кгс/м^2; ρ — плотность спирта, г/см^3; k — постоянная прибора, согласно формуле

$$k = \rho\left(\sin\alpha + \frac{F_1}{F_2}\right). \tag{9-2-7}$$

Пример. Микроманометр имеет шкалу 0—250 кгс/м^2, плотность заполняющего прибор этилового спирта $\rho = 0{,}8095$ г/см^3, угол наклона измерительной трубки $\alpha = 29°30'$, $\sin\alpha = 0{,}492$, отношение $F_1/F_2 = 0{,}0025$.

Определим значение постоянной прибора, пользуясь формулой (9-2-7)

$$k = 0{,}8095\,(0{,}492 + 0{,}0025) = 0{,}4003 = 0{,}4.$$

Пользуясь уравнением (9-2-6), определим верхний предел измерения прибора: $p = 250 \cdot 0{,}4 = 100$ кгс/м^2.

Если $F_1/F_2 > {}^1/_{400}$, то значение постоянной прибора может быть определено и без учета поправки на отношение F_1/F_2. В этом случае имеем:

$$p = n\rho\sin\alpha = nk_1, \tag{9-2-8}$$

где $k_1 = \rho\sin\alpha$ — постоянная прибора.

Если для микроманометра значение постоянной (k или k_1) было определено с учетом ρ, то он должен заполняться спиртом

с плотностью, значение которой указано на приборе. В противном случае значения постоянных должны быть умножены на поправочный множитель, равный ρ_1/ρ, т. е.

$$k' = k\frac{\rho_1}{\rho} \quad \text{и} \quad k'_1 = k_1\frac{\rho_1}{\rho}, \tag{9-2-9}$$

где ρ_1 — фактическое значение плотности спирта.

Перед заполнением прибора спиртом, чаще всего содержащим некоторое количество воды, необходимо предварительно определить его плотность ρ_1.

По схеме, показанной на рис. 9-2-1, выполняют микроманометры с переменным углом наклона измерительной трубки. Благодаря этому прибор может иметь несколько диапазонов измерения.

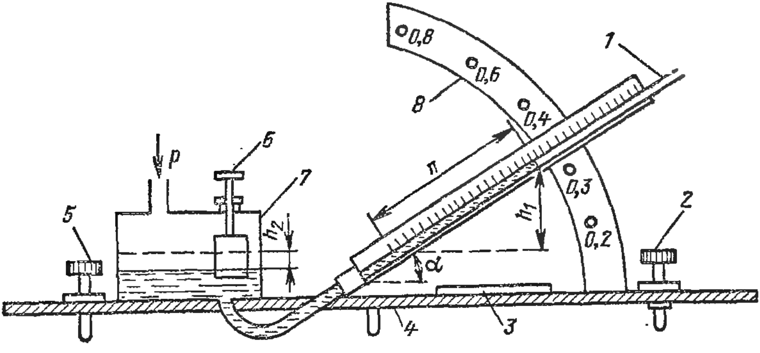


Рис. 9-2-2. Схема микроманометра типа ММН.

В качестве примера рассмотрим устройство микроманометра типа ММН с пятью диапазонами измерения (0—50, 0—75, 0—100, 0—150 и 0—200 кгс/м²). Схема этого прибора представлена на рис. 9-2-2. Прибор состоит из широкого сосуда *7*, измерительной трубки *1*, закрепленной на поворотном кронштейне, и приспособления *8* для фиксации угла наклона α измерительной трубки. Сосуд и все другие детали прибора укреплены на общем основании *4*. Микроманометр имеет шкалу 0—250 кгс/м². Прибор снабжен двумя уровнями *3* с цилиндрическими ампулами. Для установки прибора по уровням служат два винта (*2* и *5*). Для установки в измерительной трубке уровня жидкости против нулевой отметки шкалы служит вытеснитель *6*.

Для изменения диапазона измерения кронштейн с измерительной трубкой может быть установлен под пятью различными фиксированными углами наклона к горизонтальной плоскости. Каждому фиксированному углу наклона измерительной трубки, а следовательно, и заданному диапазону измерения соответствует определенное значение постоянной прибора.

Для фиксации кронштейна с измерительной трубкой при заданном значении постоянной прибора служит установочная дуга *8*

с отверстиями. Кронштейн соединяется с дугой в нужном рабочем положении с помощью конического штифта, который на схеме прибора не показан. Значения постоянных микроманометра (0,2; 0,3; 0,4; 0,6 и 0,8) для указанных выше пяти диапазонов измерения и при заполнении его этиловым спиртом плотностью 0,8095 г/см^3 обозначены против отверстий на установочной дуге. Приборы этого типа выпускаются классов точности 0,5 и 1.

Для более точного измерения малых давлений, разрежений или разностей давлений применяют микроманометры, снабженные оптическим устройством и двумя шкалами или нониусом, и микроманометры компенсационного типа.

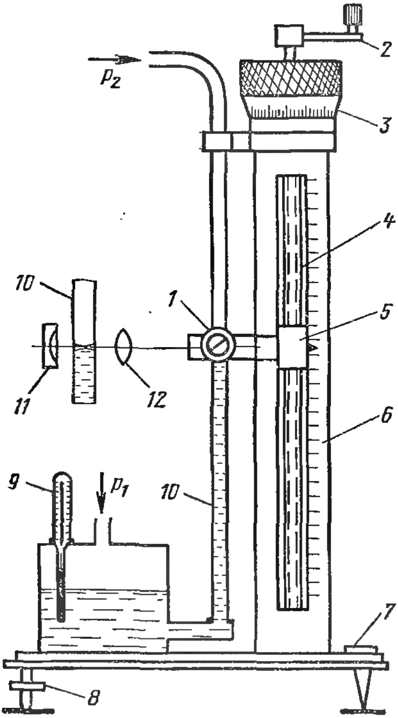


Рис. 9-2-3. Микроманометр типа АЛД.

На рис. 9-2-3 показан схематично микроманометр типа АЛД. Высокая точность измерения высоты столба жидкости достигается с помощью оптического устройства *1*, состоящего из лупы *12* и вогнутого зеркала *11*. Оптическое устройство укреплено на каретке *5*, которая является одновременно гайкой микрометрического винта *4*. При вращении микрометрического винта с помощью рукоятки *2*, каретка-гайка будет перемещаться вверх или вниз. Когда указатель каретки находится на уровне мениска жидкости в измерительной стеклянной трубке *10*, то через лупу виден как сам мениск, так и его перевернутое изображение в вогнутом зеркале. Когда прямое и перевернутое изображения соприкоснутся, можно производить отсчет показаний по шкалам *3* и *6*. По вертикальной шкале *6* с делениями от 0 до 200 мм и ценой деления 2 мм отсчитываются целые числа миллиметров, а по круговой шкале *3* — доли деления. Шкала *3* разделена на 40 частей, и при шаге микрометрического винта 2 мм цена деления этой шкалы 0,05 мм.

Микроманометр снабжен термометром *9* для определения температуры спирта в металлическом сосуде, уровнем *7* и установочными винтами *8*.

Верхний предел измерения при заполнении микроманометра спиртом-ректификатом равен 160 мм вод.ст. Пределы допускаемой основной погрешности рабочих микроманометров типа АЛД не превышают $\pm 0,10\%$, а образцовых — $\pm 0,05\%$ верхнего предела измерений.

По схеме прибора, показанного на рис. 9-2-3, выполняется микроманометр типа Прандтля. В приборе этого типа металлический сосуд сообщается со стеклянной трубкой с помощью особого крана — переключателя. Этот кран допускает: непосредственное соединение трубки с сосудом, их соединение через три капиллярных канала различной длины, а также разъединение трубки и сосуда. Три капиллярных канала крана являются демпфирующим приспособлением, необходимым при измерении колеблющихся давлений, разрежений или разностей давлений.

Микроманометры типа Прандтля изготовляются с верхними пределами измерения 280 и 400 мм вод.ст. Пределы допускаемой основной погрешности рабочих приборов не превышают соответственно ±0,08 и ±0,06%, а образцовых — ±0,04 и ± 0,03% верхнего предела измерений.

Рассмотрим микроманометр типа ММ, показанный на рис. 9-2-4. Он является прибором компенсационного типа и предназначается для измерения давления, разрежения или разности давлений воздуха и неагрессивных газов. Микроманометр состоит из двух сосудов *7* и *8*, соединенных между собой резиновой трубкой

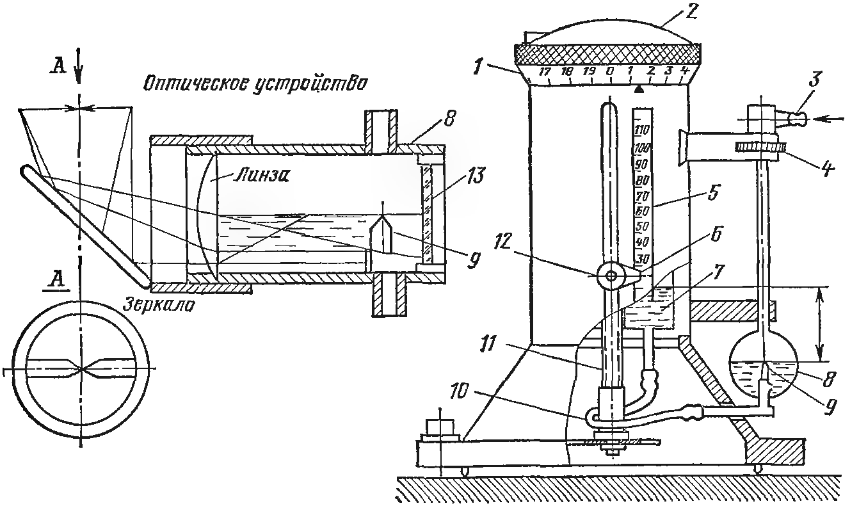


Рис. 9-2-4. Микроманометр компенсационного типа ММ.

10. В центре сосуда *7* имеется гайка, через которую проходит микрометрический винт *11*. Нижний конец микрометрического винта шарнирно соединен со станиной прибора, а верхний скреплен неподвижно с головкой *2*. Таким образом, вращая головку *2*, можно сосуд *7* перемещать вверх или вниз вдоль оси винта *11*. Сосуд *7* перемещают до тех пор, пока уровень воды в сосуде *8* не коснется острия визирного штифта *9*. Луч света, попадающий через боковое стекло *13*, дает возможность наблюдать касание острия визирного штифта с его отражением от поверхности воды через специальное оптическое устройство, показанное на рис. 9-2-4.

Перед началом работы прибор устанавливают по уровню, а указатель *6* и головку *2* устанавливают на нулевые отметки. Затем наполняют сосуды дистиллированной водой так, чтобы острие визирного штифта, видимое в зеркале, касалось своего отражения.

Для точной подгонки нуля поднимают или опускают сосуд *8*, вращая гайку *4*. При измерении разрежения объект присоединяется к наконечнику *12*, а при измерении давления — к наконечнику *3*. Если необходимо измерить разность давлений, то область с большим давлением присоединяют к наконечнику *3*, а с меньшим — к наконечнику *12*.

Под влиянием давления или разности давлений вода в сосуде *7* поднимется, а в сосуде *8* опустится. Вращая головку *2*, поднимают сосуд *7* и добиваются в зеркале совпадения вершины визирного штифта со своим отражением. Отсчет измеренного давления производят в миллиметрах водяного столба непосредственно по двум шкалам: целое число делений отсчитывается по шкале *5*, а дробные подразделения — по шкале *1*. Шкала *5* имеет деления через 2 мм, а шкала *1* разделяется на 200 частей с ценой деления, равной 0,01 мм.

Микроманометры типа ММ изготовляются с диапазонами измерений 0—120, 0—150 и 0—250 мм вод.ст. Пределы допускаемой основной погрешности рабочих приборов на указанные диапазоны измерений не превышают ±0,12 мм вод. ст., а образцовых — ±0,06 мм вод. ст.

9-3. Поправки к показаниям жидкостных приборов

При выполнении измерений с помощью жидкостных приборов необходимо учитывать дополнительные погрешности, обусловленные влиянием температуры и ускорения свободного падения. При необходимости эти погрешности могут быть исключены путем введения соответствующих поправок в показания прибора.

Как было сказано выше, при измерении давления или разрежения жидкостными приборами за меру давления принимают высоту столба жидкости h, выраженную в миллиметрах водяного или ртутного столба; при этом столб жидкости относят соответственно к $t_0 = 4°C$ для воды или к $t_0 = 0°C$ для ртути и нормальному ускорению свободного падения $g_н = 9{,}80665$ м/с². В действительности высота столба жидкости по шкале прибора отсчитывается при иных значениях температуры и ускорения свободного падения. Поэтому необходимо непосредственный отсчет по прибору корректировать, т. е. приводить его показания к нормальным условиям (t_0 и $g_н$). При этом длину шкалы жидкостного прибора приводят к $t_{20} = 20°C$, так как миллиметровые деления шкалы наносят и поверяют при этой температуре.

Если h_t — высота столба рабочей жидкости, отсчитанная при температуре t, то высота столба жидкости h_0 при температуре $t_0 = 4°C$ для воды ($t_0 = 0°C$ для ртути) и $t_{20} = 20°C$ для шкалы равна:

$$h_0 = h_t\{1 - [\beta(t - t_0) - \alpha(t - t_{20})]\}. \qquad (9\text{-}3\text{-}1)$$

Для приведения отсчитанной высоты столба рабочей жидкости при температуре t к указанной температуре значение поправки, как это следует из выражения (9-3-1), определяется по формуле

$$c_t = h_0 - h_t = h_t[\alpha(t - t_{20}) - \beta(t - t_0)], \qquad (9\text{-}3\text{-}2)$$

где β — средний коэффициент расширения рабочей жидкости в области температур, близких к 20°C (для ртути равный 0,00018, воды — 0,0002, этилового спирта — 0,0011 K^{-1}); α — коэффициент линейного расширения материала шкалы (для латуни равный 0,000019, стали — 0,000012, стекла — 0,000008 K^{-1}).

Для определения высоты столба жидкости $h_н$, соответствующей нормальному ускорению свободного падения $g_н = 9{,}80665$ м/с², необходимо высоту столба h_t, отсчитанную при местном ускорении свободного падения g, умножить на отношение $g/g_н$. В этом случае значение поправки для приведения h_t к нормальному ускорению свободного падения равно:

$$c_g = h_н - h_t = h_t\left(\frac{g}{g_н} - 1\right). \qquad (9\text{-}3\text{-}3)$$

Таким образом, действительное значение высоты столба рабочей жидкости $h_{0н}$, соответствующее нормальным условиям, определяется по формуле

$$h_{0н} = h_t + c_t + c_g. \tag{9-3-4}$$

Пример 1. Измеренное давление жидкостным манометром $h_t = 700$ мм рт. ст. при $t = 30$°С и $g = 9{,}8155$ м/с^2 (для Москвы). Коэффициенты β и α соответственно равны 0,00018 и 0,000012 К$^{-1}$.

Находим значения поправок c_t и c_g, пользуясь формулами (9-3-2) и (9-3-3):

$$c_t = 700\,(0{,}000012 \cdot 10 - 0{,}00018 \cdot 30) = -3{,}7 \text{ мм рт. ст.};$$

$$c_g = 700\left(\frac{9{,}8155}{9{,}80665} - 1\right) = +0{,}6 \text{ мм рт. ст.}$$

Пользуясь формулой (9-3-4), определяем действительное значение высоты столба рабочей жидкости $h_{0н}$, соответствующее нормальным условиям:

$$h_{0н} = 700 - 3{,}7 + 0{,}6 = 696{,}9 \approx 697 \text{ мм рт. ст.}$$

Таким образом, действительное давление меньше на 3 мм рт. ст. (0,4%) по сравнению с давлением, измеренным по прибору.

Если необходимо найти значение высоты столба рабочей жидкости h_{tg}, которое должно соответствовать при температуре t некоторому заданному давлению в местности с ускорением свободного падения g, можно воспользоваться формулой

$$h_{tg} = h_{0н} + c'_t + c'_g. \tag{9-3-5}$$

Здесь c'_t и c'_g — поправки соответственно на температуру и ускорение свободного падения,

$$c'_t = h_{0н}\,[\beta\,(t - t_0) - \alpha\,(t - t_{20})]; \tag{9-3-6}$$

$$c'_g = h_{0н}\left(\frac{g_н}{g} - 1\right). \tag{9-3-7}$$

Пример 2. Найдем значение высоты водяного столба h_{tg}, которое должно соответствовать давлению 500 кгс/м^2 при $g = 9{,}8155$ м/с^2 (для Москвы). При $t_0 = 4$°С и $g = 9{,}80665$ м/с^2 давлению 500 кгс/м^2 соответствует $h_{0н} = 500$ мм вод. ст. Пользуясь формулами (9-3-6) и (9-3-7), определяем поправки c'_t и c'_g, принимая $\beta = 0{,}0002$ К$^{-1}$ и $\alpha = 0{,}000012$ К$^{-1}$:

$$c'_t = 500\,[0{,}0002\,(20 - 4) - \alpha\,(20 - 20)] = +1{,}6 \text{ мм вод. ст.};$$

$$c'_g = 500\left(\frac{9{,}80665}{9{,}8155} - 1\right) = -0{,}5 \text{ мм вод. ст.}$$

По формуле (9-3-5) для Москвы

$$h_{tg} = 500 + 1{,}6 - 0{,}5 = 501{,}1 = 501 \text{ мм вод. ст.}$$

При тех же условиях для г. Еревана ($g = 9{,}7990$ м/с^2)

$$h_{tg} = 500 + 1{,}6 + 0{,}4 = 502 \text{ мм вод. ст.}$$

9-4. Барометры ртутные

Барометры предназначаются для измерения атмосферного давления. Применение их в технике необходимо главным образом при определении абсолютного давления. Ртутные барометры бывают двух типов: чашечные и сифонные. Наибольшее распространение получили чашечные барометры.

На рис. 9-4-1 показан чашечный ртутный барометр. В барометре этого типа широкий сосуд и стеклянная трубка заключены в металлическую оправу *1* и *8*. В верхней части этой оправы имеется сквозная прорезь *3* для наблюдения уровня ртути в стеклянной трубке. Вдоль прорези на латунной оправе нанесена шкала в миллиметрах с ценою деления 1 мм рт. ст. В прорези оправы помещен специальный визир *4*, снабженный нониусом с ценою деления 0,1 мм рт. ст. Визир можно перемещать в прорези с помощью винта *5*. Этим винтом осуществляется точная наводка визира на верхний уровень мениска ртути в трубке. Погрешность отсчета для барометров этого типа не превышает 0,1 мм рт. ст.

Барометр должен находиться в вертикальном положении, для чего он свободно подвешивается на кольце *2*. Снаружи к оправе *6* прикреплен термометр *7*, который позволяет определять температуру ртутного столба и шкалы барометра.

За меру атмосферного давления, как известно, принимают высоту ртутного столба, выраженную в миллиметрах при 0°С и нормальном ускорении свободного падения $g_н = 9{,}80665$ м/с². В действительности высота ртутного столба по барометру обычно отсчитывается при иных значениях температуры и ускорения свободного падения. Поэтому показания барометра необходимо приводить к

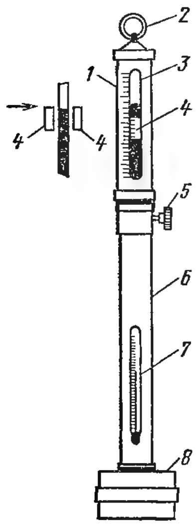


Рис. 9-4-1. Чашечный ртутный барометр.

0°С и нормальному ускорению свободного падения, пользуясь формулами

$$h_0 = h_t\,[1-(\beta-\alpha)\,t]; \qquad (9\text{-}4\text{-}1)$$

$$h_н = h_t\,\frac{g}{g_н}, \qquad (9\text{-}4\text{-}2)$$

где h_0 — показания барометра, приведенные к 0°С, мм рт. ст.; h_t — показания барометра при температуре t, мм рт. ст.; β — коэффициент расширения ртути, равный 0,00018 K^{-1}; α — коэффициент линейного расширения латуни (шкалы барометра), равный 0,000019 K^{-1}; $h_н$ — показания барометра, приведенные к нормальному ускорению силы тяжести, мм рт. ст.

Значение местного ускорения свободного падения g может быть определено по формуле

$$g = g_н\,(1-0{,}0026\cos 2\varphi - 0{,}0000002H), \qquad (9\text{-}4\text{-}3)$$

где φ — географическая широта; H — высота над уровнем моря, м.

Из изложенного выше следует, что к отсчитанному значению по ртутному барометру вводят следующие поправки:

c_0 — поправка для приведения показания барометра к 0°С согласно формуле $c_0 = h_0 - h_t = h_t(\beta-\alpha)t$;

c_g — поправка для приведения показаний барометра к нормальному ускорению свободного падения, т. е. к значению ускорения на географической широте 45° и уровне моря согласно формуле

$$c_g = h_0\left(\frac{g}{g_н}-1\right),$$

или $c_g = c_ш + c_у$, где $c_ш$ — поправка для приведения к широте 45°, а $c_у$ — поправка для приведения к уровню моря (табл. П9-4-2).

Значение c_0 может быть взято из табл. П9-4-3. Кроме этих поправок к отсчету по барометру должна быть прибавлена инструментальная поправка $c_и$, которая берется из свидетельства к барометру.

Таким образом, действительное значение барометрического давления, приведенное к 0°С и нормальному ускорению свободного падения, определяется по формуле

$$h_н = h_t + c_0 + c_g + c_и. \qquad (9\text{-}4\text{-}4)$$

Если необходимо знать значение барометрического давления в данной местности, то поправку c_g вводить не следует.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ С УПРУГИМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

10-1. Общие сведения и основные свойства упругих чувствительных элементов

Приборы давления, основанные на использовании деформации или изгибающего момента упругих чувствительных элементов, воспринимающих измеряемое давление среды и преобразующих его в перемещение или усилие, применяют в различных областях техники в широком диапазоне измерений — от 5 кгс/м² (50 Па) до 10 000 кгс/см² (1000 МПа). Они изготовляются в виде тягомеров, напоромеров, тягонапоромеров, манометров, вакуумметров и мановакуумметров. Эти приборы подразделяются на следующие разновидности:

1. Приборы давления прямого действия — показывающие и самопишущие, у которых перемещение центра или свободного конца упругого чувствительного элемента, вызываемое действием давления, при помощи дополнительного механизма преобразуется в перемещение отсчетного устройства для показания или для показания и записи измеряемой величины.

2. Приборы давления прямого действия и реле давления (без отсчетных устройств), снабженные электроконтактами и предназначенные для целей измерения и сигнализации или только сигнализации отклонения давления от заданного значения, а также для работы в схемах защиты, блокировки или позиционного регулирования.

3. Первичные приборы давления с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами переменного тока или пневматическим и составляющие с взаимозаменяемыми вторичными показывающими или самопишущими приборами отдельные измерительные комплекты. Некоторые приборы этого типа используются также в системах автоматического регулирования и управления.

4. Первичные приборы давления с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированным выходным сигналом постоянного тока и предназначенные для работы с взаимозаменяемыми вторичными показывающими

или самопишущими приборами в системах автоматического регулирования и с информационно-вычислительными машинами.

В зависимости от назначения приборы давления с упругими чувствительными элементами разделяются на образцовые и рабочие.

В качестве упругих чувствительных элементов в приборах давления используются мембраны, мембранные коробки, сильфоны и трубчатые пружины. Мембраны, мембранные коробки и сильфоны применяют в качестве чувствительных элементов также и в дифманометрах (гл. 12).

Одной из основных характеристик упругого чувствительного элемента является зависимость перемещения λ определенной его точки от действующей нагрузки p (давления или разности давлений) или сосредоточенной силы q. Статическая характеристика $\lambda = f(p)$ или $\lambda = f(q)$ упругого чувствительного элемента в зависимости от конструкции и способа его нагружения может быть линейной и нелинейной. Обычно при проектировании упругих чувствительных элементов стремятся получить линейную их характеристику, а в случае нелинейной характеристики для получения равномерной шкалы прибора применяют различные спрямляющие устройства.

Важными параметрами, определяющими рабочие качества упругого чувствительного элемента, являются его жесткость, а также чувствительность — величина, обратная жесткости. Если статическая характеристика $\lambda_q = f(q)$ или $\lambda_p = f(p)$ упругого чувствительного элемента линейна, то жесткость равна отношению силы q или давления к соответствующему перемещению λ

$$k_q = \frac{q}{\lambda_q} \quad \text{и} \quad k_p = \frac{p}{\lambda_p}, \tag{10-1-1}$$

где k_q — жесткость по силе в кгс/мм (Н/м); k_p — жесткость по давлению в кгс/см^2/мм (Па/м).

Чувствительность упругого элемента представляет собой величину, обратную жесткости,

$$s_q = \frac{\lambda_q}{q} \quad \text{и} \quad s_p = \frac{\lambda_p}{p}, \tag{10-1-2}$$

где s_q — чувствительность по силе в мм/кгс (м/Н); s_p — чувствительность по давлению в мм/кгс/см^2 (м/Па).

При нелинейной статической характеристике жесткость и чувствительность упругого элемента изменяются с давлением p и определяются следующими выражениями:

$$k_p = \frac{dp}{d\lambda_p} \quad \text{и} \quad s_p = \frac{d\lambda_p}{dp}.$$

Если перемещение определенной точки упругого чувствительного элемента под действием давления p или разности давлений $p_1 - p_2$ равно перемещению под влиянием сосредоточенной силы q, то имеет место равенство сил

$$q = pF_{\text{эф}}, \quad \text{или} \quad q = (p_1 - p_2)\,F_{\text{эф}}. \tag{10-1-3}$$

Здесь $F_{эф}$ — эффективная площадь упругого чувствительного элемента.

Значение эффективной площади зависит от размеров упругого чувствительного элемента и характера его деформаций под нагрузкой. Если упругий чувствительный элемент имеет линейную характеристику по давлению, то его эффективная площадь практически остается постоянной на всем участке рабочего хода.

Согласно равенствам (10-1-1) и (10-1-3) эффективную площадь можно выразить как отношение жесткости по силе к жесткости по давлению

$$F_{эф}=\frac{k_q}{k_p}. \qquad (10\text{-}1\text{-}4)$$

Приведенные соотношения и введенное понятие эффективной площади упругого чувствительного элемента позволяют осуществлять переход от характеристики по силе к характеристике по давлению и наоборот.

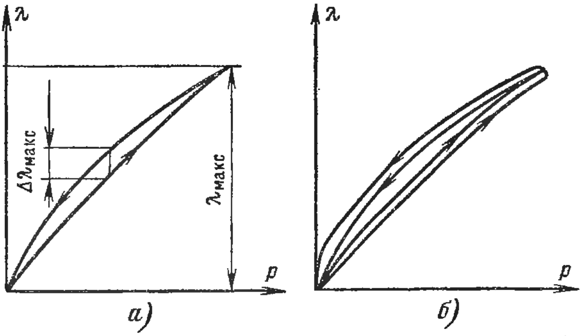


Рис. 10-1-1. Статическая характеристика упругого чувствительного элемента с гистерезисом.

Для обеспечения надежной работы упругого чувствительного элемента необходимо, чтобы размер напряжений, возникающих в материале его под действием внешних и внутренних сил, не превышал предела упругости.

Вследствие несовершенства упругих свойств реальных материалов ход статической характеристики $\lambda = f(p)$ чувствительного элемента при увеличении и уменьшении нагрузки в пределах упругих деформаций неоднозначен и образует так называемую **петлю гистерезиса** (рис. 10-1-1, *а*). Размер гистерезиса является важной характеристикой, поскольку он определяет погрешность прибора. Существенное влияние на размер гистерезиса оказывают химический состав, структура материала и значение напряжений в материале чувствительного элемента. Гистерезис выражается обычно в процентах:

$$\delta_г=\frac{\Delta\lambda_{макс}}{\lambda_{макс}}100; \qquad (10\text{-}1\text{-}5)$$

здесь $\Delta\lambda_{макс}$ и $\lambda_{макс}$ определяются, как показано на рис. 10-1-1, *а*.

Несовершенство упругих свойств материала выражается также в том, что при постоянной нагрузке возможно изменение деформаций во времени. Это явление называется последействием. Если после снятия нагрузки деформации по истечении некоторого времени исчезают полностью, то такое последействие называется упругим. В результате упругого последействия стрелка прибора после снятия нагрузки не сразу возвращается на нуль. Следует иметь в виду, что упругое последействие, складываясь с «чистым» гистерезисом, дает увеличение петли гистерезиса (рис. 10-1-1, *б*). Поскольку имеет место одновременное проявление упругого последействия и «чистого» гистерезиса, то в практике их обычно не разделяют, а результат их совместного действия называют «практическим гистерезисом» или просто гистерезисом.

Стабильность характеристик упругого чувствительного элемента во времени может измениться вследствие пластического течения ползучести материала, которое может возникнуть при нормальной температуре и напряжениях, меньших предела упругости. Это связано с неоднородностью структуры материала и появлением в его микрообъемах остаточных напряжений при изготовлении. Пластическое течение материала во времени может проявляться в форме пластического последействия и релаксации.

Под пластическим последействием понимают явление, при котором некоторая часть деформации в чувствительном элементе сохраняется при полной его разгрузке по истечении любого интервала времени. Известно, что увеличение пластической деформации приводит к уменьшению упругой деформации, а вместе с тем к уменьшению напряжений в материале чувствительного элемента. По истечении достаточно длительного времени напряжения в чувствительном элементе могут полностью исчезнуть. Ослабление напряжений с течением времени при условии постоянной деформации называется релаксацией напряжений. Интенсивная релаксация напряжений в упругом чувствительном элементе может быть причиной выхода его из строя.

Для уменьшения влияния релаксации и последействия на рабочие качества упругих чувствительных элементов они подвергаются в процессе изготовления стабилизации, т. е. специальной технологической операции, во время которой процессы пластического течения почти полностью заканчиваются.

Поскольку при работе упругого чувствительного элемента возникновение заметных пластических деформаций недопустимо, рабочие напряжения должны оставаться меньше предела упругости. Для правильно спроектированного упругого чувствительного элемента наибольшее рабочее напряжение не должно превышать $\sigma_{макс} = \sigma_{пр}/n$, где $\sigma_{пр}$ — предельное напряжение, при котором упругий элемент достигает предельного состояния, недопустимого для его нормальной работы, а n — коэффициент запаса. Необходимое значение коэффициента запаса определяется требуемой надеж-

ностью упругого чувствительного элемента, условиями его работы, достоверностью данных о механических свойствах материала, точностью расчета напряжений и т. д. [48].

Упругие чувствительные элементы обычно изготовляют из достаточно пластичных материалов, которые в результате специальной технологической операции способны приобрести высокую упругость и прочность. Из числа применяемых материалов наилучшими технологическими и эксплуатационными свойствами обладают дисперсионно-твердеющие сплавы, например Бр.Б2; Бр.Б2,5; Н36ХТЮ и др.

При применении приборов давления следует иметь в виду, что в условиях переменной температуры изменение модуля упругости большинства материалов упругих чувствительных элементов приводит к появлению дополнительной температурной погрешности показаний прибора. В некоторых случаях дополнительная температурная погрешность может возникнуть также в результате изменения линейных размеров упругого чувствительного элемента при его нагреве.

10-2. Упругие чувствительные элементы

Ниже рассматриваются наиболее распространенные типы упругих чувствительных элементов, применяемых в приборах давления, а также в дифференциальных манометрах (гл. 12).

Плоские мембраны. Плоские мембраны, изготовляемые из стали и бронзы, представляют собой круглые тонкостенные пластины постоянной толщины. Под действием равномерно распределенного давления или сосредоточенной силы заделанная по краям плоская мембрана прогибается при наличии не только изгибных деформаций, но и растягивающих напряжений и вследствие этого имеет нелинейную статическую характеристику $\lambda = f(p)$ (рис. 10-2-1). При использовании плоских мембран в качестве рабочего участка используется обычно небольшая часть возможного хода ее.

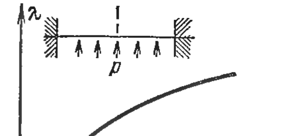


Рис. 10-2-1. Плоская мембрана и ее статическая характеристика.

Плоские мембраны находят применение главным образом в приборах давления специальных конструкций, например пьезокварцевых, емкостных, индуктивных, с тензопреобразователями и т. д. Приборы этого типа обладают малой инерционностью и их можно использовать для измерения переменных давлений с частотой до нескольких сотен и тысяч герц.

Выпуклые мембраны. Выпуклые (хлопающие) мембраны, изготовляемые из стали или бронзы, могут быть использованы в реле

давления для сигнализации отклонения давления от заданного значения. При воздействии давления p на мембрану ее прогиб λ на начальном участке *oea* статической характеристики (рис. 10-2-2) возрастает плавно. Далее при увеличении давления происходит потеря устойчивости мембраны и она изменяет свой прогиб скачком (участок *ab* характеристики). При этом мембрана замыкает или размыкает электроконтакты, показанные схематично на рис. 10-2-2. При дальнейшем увеличении давления прогиб мембраны на участке характеристики *bc* будет снова возрастать монотонно. Если давление уменьшится до значения p_2, то мембрана также скачком возвращается на участок характеристики *oe*. Размеры «хлопающих» мембран обычно подбирают опытным путем.

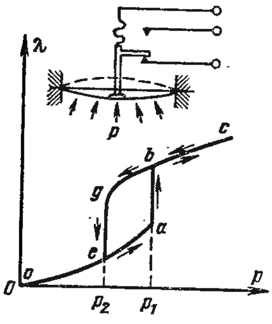


Рис. 10-2-2. Выпуклая мембрана и ее статическая характеристика.

Гофрированные мембраны и мембранные коробки. Гофрировка поверхности мембраны в виде кольцевых волн значительно повышает надежность ее работы и спрямляет характеристику мембраны. На рис. 10-2-3 показаны наиболее распространенные формы профилей гофрированных мембран. Гофрированные одиночные мембраны в качестве чувствительных элементов применяются редко. Наибольшее применение в приборах давления (тягомерах, напоромерах, дифманометрах и других приборах) получили мембранные коробки, образованные двумя спаянными или сваренными гофрированными мембранами (рис. 10-2-4, *а*), и блоки из двух или нескольких мембранных коробок (рис. 10-2-4, *б*).

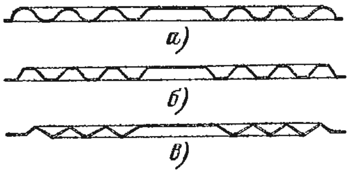


Рис. 10-2-3. Формы профилей гофрированных мембран.

а — синусоидальная; *б* — трапецеидальная; *в* — пильчатая.

В тех случаях, когда необходимо иметь минимальный объем внутренних полостей чувствительного элемента, например при измерении перепада давления (что является желательным особенно для дифманометров-расходомеров), применяют блок, состоящий из двух складывающихся мембранных коробок с жидкостным заполнением (рис. 10-2-4, *в*). Такой мембранный блок, разработанный на заводе «Манометр», не теряет своих свойств в случае перегрузки давлениями p_1 и p_2. Если фактическая разность давлений $p_1 - p_2$ превышает верхний предел измерений, на который рассчитан прибор, или одна из мембранных коробок находится под воздействием односторонней перегрузки давлением, повреждения мембранной коробки не произойдет, так как обе мембраны сложатся по профилю, вытеснив жидкость во вторую коробку.

Для защиты мембранных коробок от возможной перегрузки давлением применяют также специальные упоры, ограничивающие деформацию мембран.

На рис. 10-2-5 представлены кривые, дающие общее представление о влиянии гофрировки мембран на их статическую характеристику. Как видно из графиков, плоская мембрана, лишенная гофрировки ($H = 0$), имеет нелинейную характеристику, а неглубокая гофрировка ($H = 0{,}6$) приводит к значительному ее спрямлению. Дальнейшее увеличение глубины гофр приводит практически к линейной характеристике мембраны за счет большего сопротивления изгибу, чем у мембраны с мелкой гофрировкой. С увеличением глубины гофрировки жесткость мембраны возрастает. Следует отметить, что влияние формы профиля на характеристику мембраны сравнительно невелико, поэтому принято воздействовать на эту характеристику путем изменения глубины гофрировки или толщины материала. Форму профиля и число волн обычно выбирают из технологических или конструктивных соображений. В тех случаях, когда необходимо уменьшить жесткость на некотором участке характеристики мембраны, последней придают небольшую выпуклость.

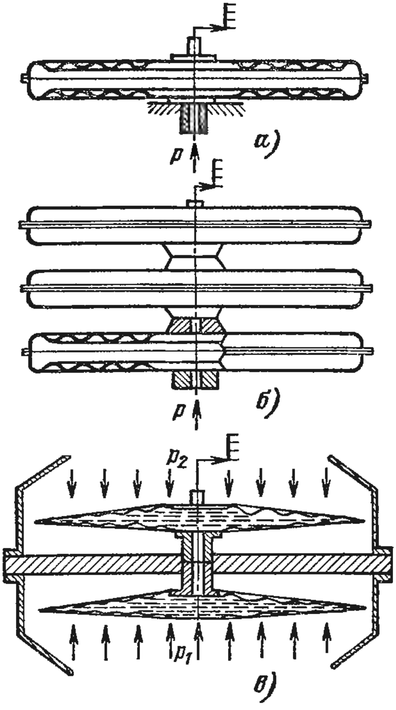


Рис. 10-2-4. Мембранная коробка и мембранные блоки.

а — мембранная коробка; *б* — блок, собранный из трех мембранных коробок; *в* — блок из двух складывающихся мембранных коробок с жидкостным заполнением.

Методы расчета и проектирования мембранных чувствительных элементов при различных условиях работы изложены в [50].

Неметаллические мембраны. Кроме металлических мембран в напоромерах, тягомерах, дифманометрах, измеряющих малые давления и разности давлений, применяют неметаллические (вялые) мембраны. Эти мембраны изготовляют из специальной сетчатой ткани (капрона, шелка), покрытой бензомаслостойкой резиной или пластмассой.

Неметаллические мембраны, как правило, снабжаются жестким центром, диаметр которого обычно составляет примерно 0,8 рабочего (рис. 10-2-6, *а*). Для обеспечения постоянства эффективной площади кольцевая часть мембраны выполняется с гофром, отфор-

мованным при изготовлении ее. Мембрана с плоской кольцевой частью применяется реже, так как эффективная площадь такой мембраны может значительно изменяться. Иногда мембрану с плоской кольцевой частью устанавливают в корпусе прибора с некоторым расслаблением, а при работе она под действием давления или разности давлений натягивается и приобретает форму, аналогичную показанной на рис. 10-2-6, *а*. Следует, однако, отметить, что стабильность эффективной площади таких мембран ниже, чем у мембран с гофром, выполненным при изготовлении.

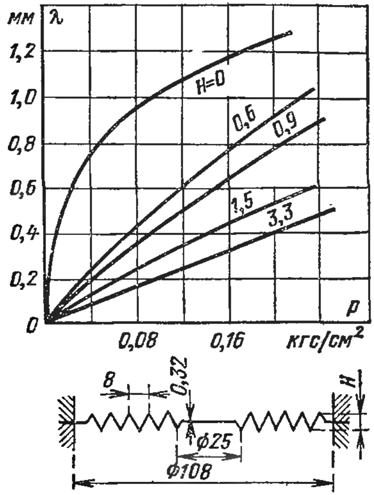


Рис. 10-2-5. Влияние глубины гофрировки на статическую характеристику мембраны.

Значение эффективной площади вялой мембраны можно определить по формуле $F_{эф} = \pi R^2_{эф}$, где $R_{эф}$ — эффективный радиус. Характеристики вялых мембран обычно снимают экспериментально, так как рассчитать их аналитически не представляется возможным. Жесткость неметаллической мембраны недостаточна, поэтому ее снабжают винтовой, а иногда плоской пружиной (рис. 10-2-6, *б*). В таком случае пружина с мембраной выполняют функции упругого элемента.

Сильфоны. Сильфон представляет собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (рис. 10-2-7, *а*). Сильфоны применяются в напоромерах и тягомерах для измерения небольшого давления

Рис. 10-2-6. Неметаллические мембраны с жестким центром.

до 4000 кгс/м² (40 000 Па), в приборах для измерения вакуумметрического давления до 1 кгс/см² (0,1 МПа), абсолютного давления до 25 кгс/см² (2,5 МПа), избыточного давления до 600 кгс/см² и разности давлений до 2,5 кгс/см² (0,25 МПа). Сильфоны при работе на сжатие выдерживают давление в 1,5—2 раза большее, чем при воздействии давления изнутри.

Жесткость сильфона зависит от геометрических его размеров, толщины стенок заготовки трубки и упругих свойств материала, радиуса закругления гофра R и угла уплотнения α (рис. 10-2-7, *а*). В тех случаях, когда необходимо увеличить жесткость сильфона, его снабжают винтовой цилиндрической пружиной (рис. 10-2-7, *б*).

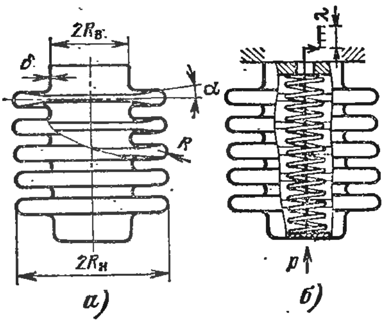


Рис. 10-2-7. Сильфоны бесшовные.

Эффективная площадь сильфона $F_{эф}$ с достаточной точностью может быть определена по эмпирической формуле

$$F_{эф} = \pi \left(\frac{R_н + R_в}{2} \right)^2, \qquad (10\text{-}2\text{-}1)$$

где $R_н$ и $R_в$ — радиусы сильфона, соответственно наружный и внутренний.

Статическая характеристика сильфонов $\lambda = f\,(q)$ или $\lambda = f\,(p)$ линейна в относительно небольших диапазонах перемещений, эффективная же площадь сильфона отличается высокой стабильностью в пределах рабочего участка характеристики. Поэтому в приборах давления сильфоны используют в режиме небольших прогибов.

Бесшовные сильфоны изготовляют гидравлическим или механогидравлическим способом из цельнотянутых тонкостенных трубок. В приборостроительной промышленности применяют также сварные сильфоны. Эти сильфоны изготовляют путем штамповки мембран из листового металла с последующей их сваркой по внутреннему и наружному контурам. На рис. 10-2-8 показан сварной сильфон симметричного профиля; применяют сильфоны и других типов, например со складывающимися гофрами. Методы расчета и проектирования бесшовных и сварных сильфонов изложены в [51].

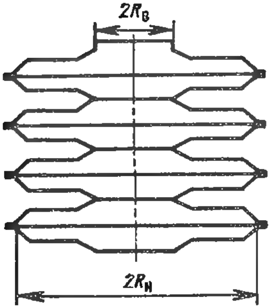


Рис. 10-2-8. Сильфон сварной.

Трубчатые пружины. Трубчатые пружины чаще всего выполняются в виде одновитковых, центральная ось которых представляет собой дугу окружности с центральным углом γ, равным 200—270° (рис. 10-2-9, *а*). Из числа этих пружин наиболее широкое применение получили пружины Бурдона эллиптического (рис. 10-2-9, *б*) и плоскоовального (рис. 10-2-9, *в*, *г*) сечения. Большая ось $2a$ поперечного сечения расположена перпендикулярно радиусу кривизны $R_к$ центральной оси (среднему радиусу) пружины. Один конец пружины Бурдона закрепляют неподвижно, а другой — свободный, закрытый пробкой и запаянный — соединяют с механизмом прибора, передаю-

щим преобразователем или другим устройством. Тонкостенные пружины Бурдона применяют в приборах для измерения вакуумметрического давления до 1 кгс/см² (0,1 МПа) и избыточного давления до 60 кгс/см² (6 МПа). Для измерения избыточного давления до 200 — 1600 кгс/см² (20—160 МПа) применяют толстостенные пружины овального сечения (рис. 10-2-9, *в*, *г*).

Под действием давления, подаваемого во внутреннюю полость трубки, пружина Бурдона деформируется в поперечном сечении, принимая форму, изображенную на рис. 10-2-9, *б* пунктиром. При этом продольное волокно *xx* элемента пружины, выделенного двумя

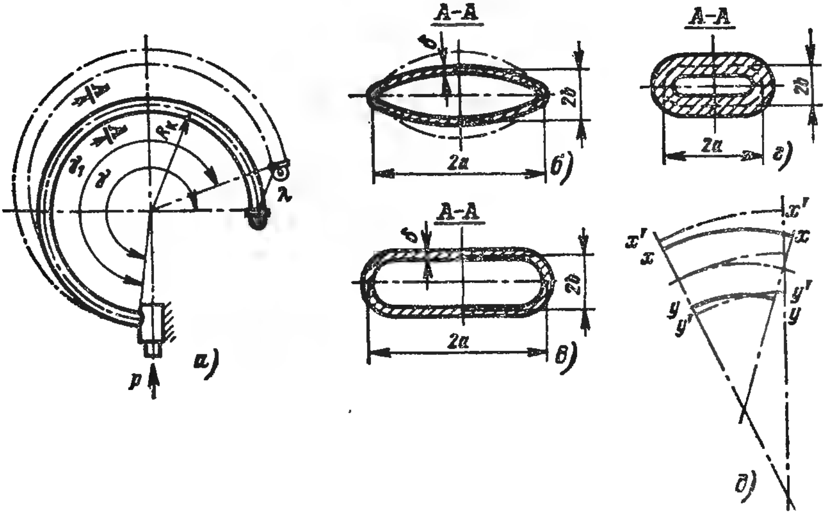


Рис. 10-2-9. Одновитковая трубчатая пружина эллиптического и плоскоовального сечения.

близкими поперечными сечениями, переходит на дугу большего радиуса в положение $x'x'$, а волокно yy — в положение $y'y'$ на дугу меньшего радиуса (рис. 10-2-9, *д*). Вследствие того что волокна стремятся сохранить свою первоначальную длину, поперечные сечения пружины Бурдона будут поворачиваться против часовой стрелки. Пружина будет разгибаться, и ее свободный конец совершит некоторое линейное перемещение λ. При этом уменьшается кривизна трубки на угол $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_1$ (рис. 10-2-9, *а*).

Трубчатая пружина тем чувствительнее, чем больше радиус ее кривизны $R_к$ и чем меньше толщина δ (рис. 10-2-9, *б*) стенок трубки. Кроме того, чувствительность пружины Бурдона, а также и ее жесткость в сильной степени зависят от отношения a/b осей поперечного сечения и формы сечения вблизи концов большой оси. Чем большую часть сечения занимают участки вблизи концов большой оси сечения, тем значительнее сопротивление, которое будут встречать волокна, расположенные вблизи концов малой

оси, в своем стремлении повернуть сечение пружины. Это согласуется и с практикой, например, пружина эллиптического сечения обладает большей чувствительностью и меньшей жесткостью, чем плоскоовального сечения.

Пружина круглого сечения практически нечувствительна к давлению, так как ее поперечное сечение не деформируется при воздействии давления.

Наиболее полно теория и методика расчета характеристик пружин Бурдона разработана В. И. Феодосьевым и Л. Е. Андреевой в работах [48, 53]. Ниже, пользуясь этими работами, приводим конечные формулы для определения некоторых основных характеристик пружин Бурдона.

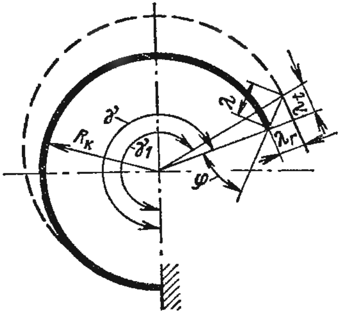


Рис. 10-2-10. Схема перемещения свободного конца трубчатой пружины.

Относительное изменение центрального угла $\Delta\gamma/\gamma$ тонкостенной пружины Бурдона в зависимости от давления p определяется по формуле

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma}=p\frac{1-\mu}{E}\frac{R_к}{b\delta}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{\alpha}{\beta+\varkappa^2}, \qquad (10\text{-}2\text{-}2)$$

где α и β — коэффициенты, зависящие от отношения a/b (табл. 10-2-1); E — модуль упругости материала пружины; δ — толщина стенки; μ — коэффициент Пуассона; $\varkappa$ — главный параметр пружины Бурдона, согласно формуле $\varkappa=\frac{R_к\delta}{a^2}$. Остальные обозначения соответствуют принятым на рис. 10-2-9.

Таблица 10-2-1

Значения коэффициентов к формулам для расчета трубчатых пружин Бурдона

Форма поперечного сечения	a/b	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
Эллиптическая	α	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,400	0,390
	β	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042
	n	0,197	0,149	0,142	0,121	0,111	0,106	0,102	0,098	0,095
Плоскоовальная	α	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,360	0,343
	β	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,119	0,118
	n	0,149	0,167	0,166	0,152	0,140	0,132	0,126	0,118	0,113

Полное перемещение λ свободного конца пружины Бурдона определяется как геометрическая сумма радиального λ_r и тангенциального λ_t перемещений (рис. 10-2-10):

$$\lambda=\sqrt{\lambda_r^2+\lambda_t^2}=\frac{\Delta\gamma}{\gamma}R_кA, \qquad (10\text{-}2\text{-}3)$$

где

$$\lambda_r=\frac{\Delta\gamma}{\gamma}R_к(1-\cos\gamma);\quad \lambda_t=\frac{\Delta\gamma}{\gamma}R_к(\gamma-\sin\gamma);\quad A=\sqrt{(1-\cos\gamma)^2+(\gamma-\sin\gamma)^2}.$$

Заменяя в формуле (10-2-3) $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ выражением (10-2-2) и учитывая соотношение (10-1-1), получаем:

$$\lambda = p\frac{1-\mu}{E}\frac{R_к^3}{b\delta}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{\alpha A}{\beta+\varkappa^2} = \frac{p}{k_p}, \tag{10-2-4}$$

где k_p — жесткость тонкостенной пружины Бурдона к воздействию давления.

Чувствительность пружины Бурдона по давлению ($s_p = 1/k_p$), как это следует из (10-2-4), равна:

$$s_p = \frac{1-\mu^2}{E}\frac{R_к^3}{b\delta}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{\alpha A}{\beta+\varkappa^2}. \tag{10-2-5}$$

Направление полного перемещения λ свободного конца пружины, а следовательно, и значение угла φ (рис. 10-2-10) определяется по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\lambda_r}{\lambda_t}. \tag{10-2-6}$$

Изменение объема внутренней полости тонкостенной пружины Бурдона определяется в зависимости от давления по формуле

$$\Delta V = 12\frac{\Delta\gamma}{\gamma}R_к ab\gamma\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{n}{\alpha}, \tag{10-2-7}$$

или в зависимости от перемещения свободного конца пружины

$$\Delta V = 12\lambda ab\gamma\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{n}{\alpha A}, \tag{10-2-8}$$

где n — коэффициент, значения которого приведены в табл. 10-2-1.

Для пружин Бурдона толстостенных с сильно вытянутым плоскоовальным сечением (рис. 10-2-11) относительное изменение центрального угла определяется по формуле

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = p\frac{1-\mu^2}{E}\frac{R_к^2}{b\delta}\frac{12(1-z)b^2}{\delta^2+12zb^2}. \tag{10-2-9}$$

Значение коэффициента z определяется в зависимости от главного параметра $\varkappa$ пружины по графику, представленному на рис. 10-2-11. Для определения значения полного перемещения λ свободного конца толстостенной пружины Бурдона можно воспользоваться выражением (10-2-4).

Статическая характеристика $\lambda = f(p)$ пружин Бурдона линейна. Для обеспечения надежной работы соотношение размеров сечения пружины Бурдона выбирают обычно с таким расчетом, чтобы обеспечивались необходимый запас прочности ее и достаточное перемещение свободного конца пружины (не менее 1—2 мм). При сверхвысоких давлениях (более 1600 кгс/см^2) пружина Бурдона, как показывает опыт отечественных приборостроительных заводов, не обеспечивает достаточного запаса прочности.

Для измерения сверхвысокого давления до 10 000 кгс/см^2 (1000 МПа) и выше применяют одновитковые трубчатые пружины с эксцентричным каналом (рис. 10-2-12), предложенные В. Г. Нагаткиным [55]. Нейтральная ось этой пружины, проходящая через центр тяжести C поперечного сечения, смещена на некоторый размер l относительно оси канала, проведенной через его центр C_0 (рис. 10-2-12).

Перемещение λ свободного конца рассматриваемой пружины происходит не из-за деформации поперечного сечения, а потому, что под действием внутреннего избыточного давления p в поперечном сечении возникает изгибающий момент. Равнодействующая P сил давления p, приложенных в полости канала пружины (рис. 10-2-12), равна $P = p\pi r^2$ и проходит через ось канала. Приводя ее к центру тяжести C поперечного сечения, получаем изгибающий момент $M = Pl = p\pi r^2 l$ и нормальную силу $q = P$. Под действием этого момента пружина изгибается в сторону более толстой стенки и ее свободный конец перемещается на размер λ. При этом перемещение свободного конца и изменение кривизны оси пружины будут пропорциональны изгибающему моменту M, а вместе с тем и давлению p.

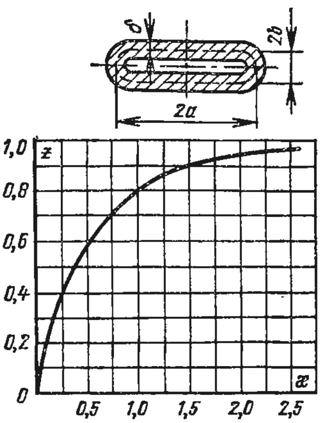


Рис. 10-2-11. График для определения коэффициента z в зависимости от $\varkappa$.

Поперечное сечение пружины Нагаткина деформируется под действием внутреннего избыточного давления незначительно и напряжения распределяются более равномерно, чем в толстостенной

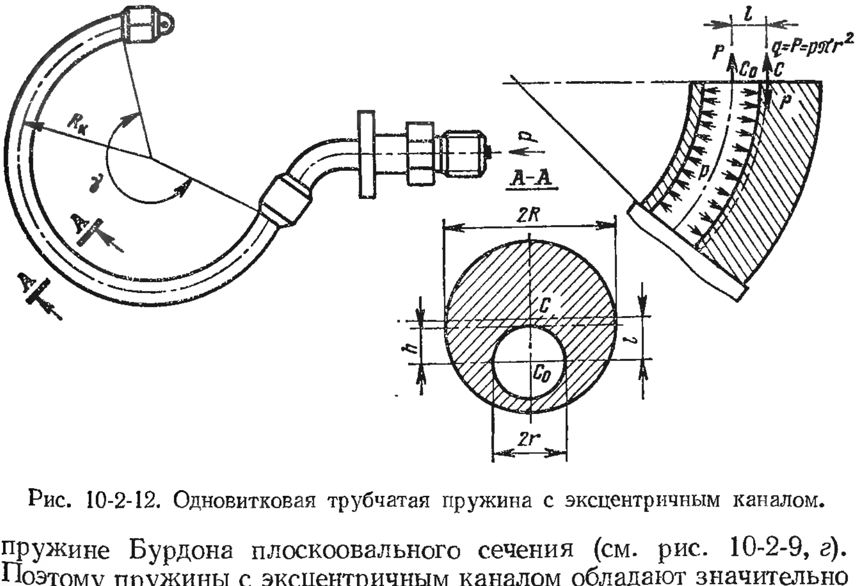


Рис. 10-2-12. Одновитковая трубчатая пружина с эксцентричным каналом.

пружине Бурдона плоскоовального сечения (см. рис. 10-2-9, *г*). Поэтому пружины с эксцентричным каналом обладают значительно большей прочностью, чем толстостенные пружины Бурдона.

Для определения основных параметров одновитковой пружины с эксцентричным каналом воспользуемся расчетными формулами, даваемыми в статье [55].

Полное перемещение λ свободного конца пружины Нагаткина определяется как геометрическая сумма радиального λ_r и тангенциального λ_t перемещений (рис. 10-2-10):

$$\lambda=\sqrt{\lambda_r^2+\lambda_t^2}, \qquad (10\text{-}2\text{-}10)$$

где

$$\lambda_r=\frac{MR_к^2}{EJ}(1-\cos\gamma)-\frac{pR_к}{EF}(\cos\gamma-1); \qquad (10\text{-}2\text{-}11)$$

$$\lambda_t=\frac{MR_к^2}{EJ}(\gamma-\sin\gamma)-\frac{pR_к}{EF}\sin\gamma, \qquad (10\text{-}2\text{-}12)$$

здесь F — площадь сечения пружины, $F=\pi(R^2-r^2)$; J — осевой момент инерции сечения пружины, согласно формуле

$$J=\frac{\pi}{4}(R_к^4-r^4)+\pi\left[R_к^2(l-h)^2-l^2r^2\right],$$

где h — эксцентриситет отверстия; $l=R_кh\,(R_к-r^2)^{-1}$ — расстояние от центра C_0 канала до центра тяжести C (рис. 10-2-12).

Значение угла φ (см. рис. 10-2-10) для пружины Нагаткина можно определить с помощью формул (10-2-6), (10-2-11) и (10-2-12).

Подсчитав значение λ, можно определить жесткость и чувствительность пружины, воспользовавшись приведенными выше соотношениями.

Верхние пределы измерения выпускаемых манометров с пружиной Нагаткина — от 1000 до 10 000 кгс/см² (100—1000 МПа).

Для измерения сверхвысокого давления применяют также прямолинейные трубчатые пружины с эксцентричным каналом (рис. 10-2-13). Под действием внутреннего избыточного давления в поперечном сечении этой трубки, так же как и в пружине Нагаткина, возникает изгибающий момент, который изгибает трубку в сторону более толстой стенки. Пружины этого типа применяются только в компенсационных манометрах с пневматическим и электрическим токовым выходными сигналами. Верхние пределы измерения этих манометров такие же, как и манометров с пружиной Нагаткина.

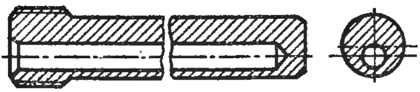


Рис. 10-2-13. Прямолинейная трубчатая пружина с эксцентричным каналом.

Одновитковые и прямолинейные трубчатые пружины с эксцентричным каналом на давление от 1000 до 10 000 кгс/см² (100—1000 МПа) изготовляют из стали 50ХФА.

10-3. Приборы давления прямого действия

Приборы прямого действия применяют в широком диапазоне измерения от нескольких десятков миллиметров водяного столба и до давлений в несколько тысяч атмосфер как в лабораторных, так и промышленных условиях. Причину этого следует видеть

в простоте устройства, портативности, простоте применения и, наконец, в их дешевизне.

Если по условиям организации централизованного технологического контроля и управления агрегатами, аппаратами или теплоэнергетическими установками приборы давления прямого действия не могут быть использованы, то применяют рассматриваемые ниже приборы электроконтактные и с дистанционной передачей показаний.

Напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры. Приборы этого типа служат для измерения небольших избыточных и вакуумметрических давлений неагрессивных газов, не превышающих обычно 4000 кгс/м² (0,04 МПа). Например, в котельных установках, печах и в ряде других случаев напоромерами измеряют избыточное давление воздуха, тягомерами — разрежение (силу тяги) в газоходах, а тягонапоромерами измеряют в топках разрежение — давление. Кроме указанных приборов изготовляются также дифференциальные тягонапоромеры, предназначенные для измерения разности вакуумметрических или избыточных давлений газа.

В качестве упругих чувствительных элементов в приборах рассматриваемых типов широко применяют мембранные коробки (см. рис. 10-2-4, *а*), а также неметаллические мембраны с жестким центром (см. рис. 10-2-6). Поэтому их называют обычно мембранными приборами.

Мембранные напоромеры, тягомеры, тягонапоромеры и дифференциальные тягонапоромеры изготовляют в виде показывающих приборов с вертикальной профильной шкалой, а иногда с концентрической шкалой. При этом их устройство принципиально одинаковое, за исключением отдельных элементов передаточного механизма и формы циферблата и корпуса. Приборы с профильным корпусом более удобны для монтажа на щитах, так как благодаря прямоугольной форме передней части прибора возможен достаточно компактный монтаж.

Для ознакомления с устройством мембранных приборов в качестве примера рассмотрим напоромеры НМП, тягомеры ТМП и тягонапоромеры ТНМП с профильной шкалой, выпускаемые приборостроительными заводами. На рис. 10-3-1 схематически изображен мембранный тягомер ТМП. В качестве упругого чувствительного элемента здесь используется мембранная коробка *1*, состоящая из двух гофрированных мембран, спаянных припоем или сваренных роликовой сваркой. Мембраны изготовлены из бериллиевой бронзы Бр.Б2,5.

С пространством (газоходом), где измеряется вакуумметрическое давление газа, внутренняя полость мембранной коробки соединяется линией (трубкой), присоединяемой к штуцеру *14*. Измеряемое разрежение газа вызывает перемещение жесткого центра верхней мембраны, соединенного с поводком *4*. Вследствие этого перемещения поводок *4* поворачивает рычаг *7*, который в свою очередь с помощью тяги *9* и рычага *10* перемещает на некоторый

угол указательную стрелку *5* вдоль шкалы *2*. Для устранения люфтов в рычажном механизме на оси указательной стрелки имеется спиральная пружина *13*.

Передаточное отношение механизма, соединяющего жесткий центр верхней мембраны со стрелкой прибора, устанавливается в зависимости от хода мембранной коробки. Грубое изменение передаточного отношения механизма производится перестановкой конца тяги *9* в одно из отверстий рычага *10*. Окончательная точная регулировка передаточного отношения осуществляется изменением длины малого плеча рычага *7* с помощью винта *8*. Этот винт своим концом упирается в плоскую пружину *6* и изгибает ее, а следовательно, позволяет менять расстояние между осью рычага *7* и концом пружины, соединенным с поводком *4*. Установка стрелки на нулевую отметку шкалы производится корректором *3*.

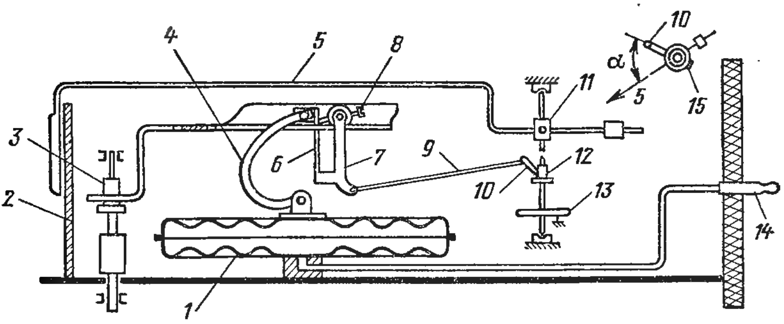


Рис. 10-3-1. Мембранный тягомер типа ТМП.

Для выпрямления шкалы прибора предусмотрена угловая коррекция в рычажном механизме. Коррекция осуществляется перемещением втулки стрелки *11* относительно втулки оси *12*, на которой закреплен рычаг *10*. Для закрепления втулки стрелки служит винт *15*. Меняя начальный угол α между рычагом *10* и стрелкой *5* от —36 до 0°, можно изменять нелинейность рычажного механизма в пределах от 2 до 12%. Так как нелинейность статических характеристик мембранных коробок с ходом около 2 и 4 мм, применяемых в приборах рассматриваемых типов, не превышает 10—15%, то ее можно полностью скорректировать.

Для выпрямления шкалы мембранного прибора применяют также плоскую пружину с нелинейной характеристикой, что достигается посадкой пружины на ряд неподвижных упоров (рис. 10-3-2). Мембранные напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры с таким способом выпрямления шкалы в настоящее время не выпускаются, но в применении находятся.

Напоромеры НМП и тягонапоромеры ТНМП по своему устройству аналогичны рассмотренному тягомеру ТМП. Верхние пределы измерений напоромеров и тягомеров лежат в интервале от 16 до

4000 кгс/м² ($0,016 \cdot 10^{-2}$ — 0,04 МПа), а тягонапоромеров — от ± 8 до ± 2000 кгс/м² ($0,008 \cdot 10^{-2}$—0,02 МПа).

Рассмотренные типы мембранных приборов выпускаются классов точности 1,5 и 2,5. Пределы допускаемой основной погрешности показаний мембранных приборов не превышают соответственно $\pm 1,5$ и $\pm 2,5\%$ диапазона измерений.

Мембранные напоромеры, тягомеры, тягонапоромеры и дифференциальные тягонапоромеры могут работать в эксплуатационных

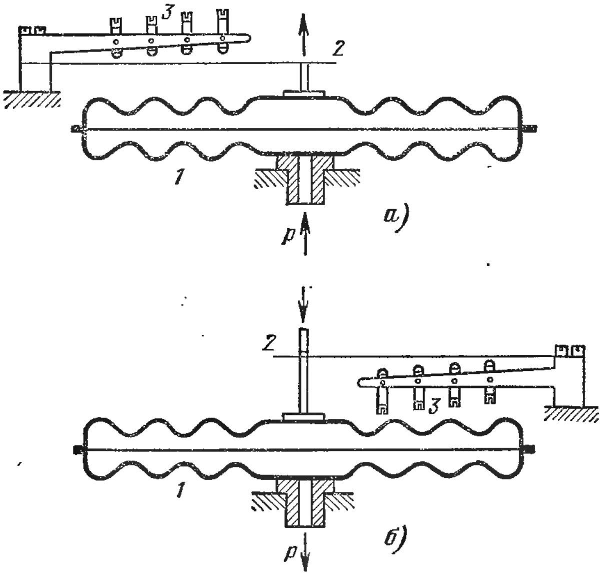


Рис. 10-3-2. Плоская пружина с нелинейной характеристикой для выпрямления шкалы напоромера (*а*) и тягомера (*б*).

1 — мембранная коробка; *2* — плоская пружина; *3* — неподвижные упоры.

условиях при температуре окружающего воздуха и среды в камере чувствительного элемента от 5 до 50°С и относительной влажности до 80%.

Изменение показаний мембранных приборов, вызванное изменением температуры окружающего воздуха от 20 ± 5°С до любой температуры в пределах от 5 до 50°С, на каждые 10°С не должно превышать

$$\Delta = \pm [x + 0{,}025\,(|\, t - t_{н}\,|)], \qquad (10\text{-}3\text{-}1)$$

где x — значение допускаемого непостоянства показаний, принимается равным половине абсолютного значения предела допускаемой основной погрешности, %; t — любое значение температуры в интервале от 5 до 50°С.

Манометры, вакуумметры и мановакуумметры. В этих приборах в качестве упругих чувствительных элементов используются сильфоны и одновитковые трубчатые пружины.

Сильфонные приборы применяются для измерения или для измерения и записи вакуумметрических и небольших избыточных давлений, не превышающих обычно 4 кгс/см² (0,4 МПа).

Для ознакомления с устройством сильфонных приборов рассмотрим самопишущий манометр типа МСС, схематически показанный на рис. 10-3-3. Сильфон *9* в целях его разгрузки снабжен винтовой пружиной *8*, которая вместе с ним создает противодействующую силу. Объект, где необходимо измерить избыточное давление среды, присоединяется к штуцеру *11*, соединенному трубкой с камерой *10*. Под действием давления среды сильфон с винтовой пружиной деформируются и дно его поднимает шток *7*. Шток поворачивает рычаг *6*, который посредством рычага *5*, тяги *4* и рычага *3* поворачивает ось *12* и сидящий на ней П-образный рычаг *1*, несущий перо *2*. Запись измеряемого давления производится на дисковой диаграмме. Диаграмма делает один оборот в сутки. Привод диаграммы осуществляется с помощью синхронного двигателя или часового механизма.

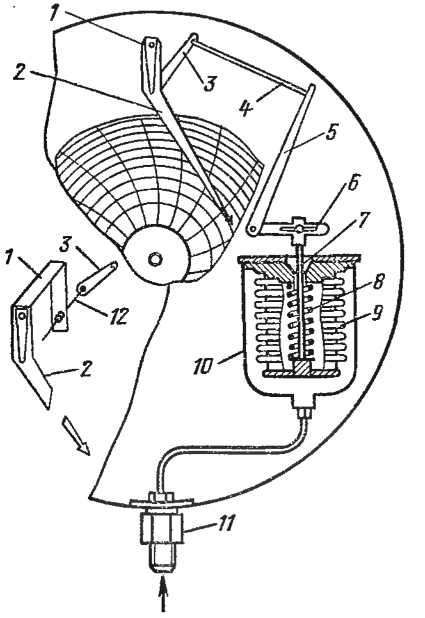


Рис. 10-3-3. Самопишущий манометр типа МСС.

Манометры этого типа выпускаются с верхними пределами измерений от 0,25 до 4 кгс/см² (0,025—0,4 МПа). Показывающие и самопишущие сильфонные манометры имеют класс точности 1,5. Сильфонные вакуумметры и мановакуумметры выпускаются класса точности 2,5.

Приборы с одновитковой трубчатой пружиной получили наибольшее распространение и применяются в широком интервале для измерения давления от 1 до 10 000 кгс/см² (0,1—1000 МПа).

Приборы с одновитковой трубчатой пружиной в зависимости от их назначения разделяются на рабочие и образцовые. Рабочие приборы в свою очередь подразделяются на приборы повышенной точности, контрольные и технические. Приборы, предназначенные для измерения с повышенной точностью, изготовляются в виде манометров (МТИ) и вакуумметров (ВТИ) классов точности 0,6 и 1 и мановакуумметров (МТИ) класса точности 1. Контрольные показывающие манометры и вакуумметры, предназначенные для поверки

технических приборов на месте их установки, изготовляются с одной стрелкой класса точности 0,6 и могут быть выполнены с двумя стрелками класса точности 1. Технические манометры, вакуумметры и мановакуумметры выпускаются классов точности 1; 1,6; 2,5 и 4. Образцовые приборы изготовляют классов точности 0,16; 0,25 и 0,4 в виде показывающих манометров типа МО и вакуумметров типа ВО. Кроме образцовых приборов указанных классов находятся в применении образцовые манометры и вакуумметры классов точности 0,2 и 0,35, выпускавшиеся ранее. Манометры образцовые типа МО выпускаются с верхними пределами измерений от 1 до 600 кгс/см² (0,1—60 МПа).

В приборах с одновитковой трубчатой пружиной (рис. 10-2-9 и 10-2-12) перемещение свободного конца пружины передается на стрелку с помощью секторного передаточного механизма. Этот механизм позволяет выполнять концентрическую шкалу с углом в 270°. Имеются отдельные типы приборов с трубчатыми пружинами Бурдона, у которых перемещение свободного конца передается на стрелку с помощью рычажного передаточного механизма, состоящего из поводка и дугообразного рычага. Шкала у приборов с таким передаточным механизмом может быть выполнена только эксцентрической с углом 90°.

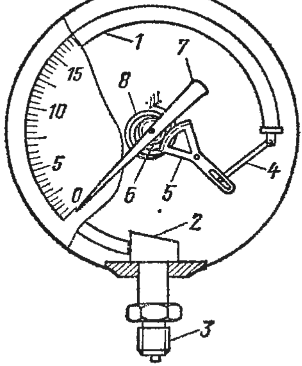


Рис. 10-3-4. Манометр с одновитковой трубчатой пружиной.

На рис. 10-3-4 схематически показано устройство показывающего манометра с одновитковой трубчатой пружиной Бурдона. Один конец трубчатой пружины *1* закреплен в держателе *2*, скрепленном с корпусом манометра. Внизу держатель снабжен шестигранной головкой и радиальным штуцером *3* с резьбой для присоединения к объекту, где надлежит измерить избыточное давление среды. Приборы давления изготовляются также с осевым штуцером, располагаемым сзади корпуса прибора. Свободный конец пружины, закрытый пробкой с серьгой и запаянный, соединен с секторным передаточным механизмом, состоящим из поводка *4*, сектора *5* и трибки *6*, на оси которой укреплена стрелка *7*. Спиральная пружина *8*, прижимающая зубцы трибки к зубцам сектора, устраняет мертвый ход.

Под влиянием измеряемого избыточного давления пружина деформируется и тянет поводок. Поводок поворачивает зубчатый сектор и соответственно трибку со стрелкой. Передвигающаяся вдоль шкалы стрелка показывает значение измеряемого избыточного давления. Перемещение свободного конца пружины, а следовательно, и угол поворота стрелки практически пропорциональны измеряемому давлению, поэтому шкала таких приборов равномерна.

Регулировка хода стрелки осуществляется изменением длины плеча сектора со стороны поводка.

Секторный передаточный механизм у манометров типа СВ, использующих одновитковую пружину с эксцентричным каналом (рис. 10-2-12), по своему устройству аналогичен секторному механизму, показанному на рис. 10-3-4. Манометры типа СВ выпускаются заводом «Манометр» с верхними пределами измерений от 1600 до 10 000 кгс/см^2 (160—1000 МПа) класса 1.

Вакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной по своему устройству аналогичны манометру (рис. 10-3-4). Если штуцер прибора соединить с пространством, в котором создано разрежение, то трубчатая пружина будет скручиваться и ее свободный конец будет перемещаться не вверх, как при измерении избыточного давления, а вниз. Поэтому стрелка вакуумметра будет двигаться в отличие от манометра справа налево. Чтобы сделать движение стрелки обычным, конец трубчатой пружины закрепляют с правой стороны держателя. Однако прямое движение стрелки не является обязательным и вакуумметры могут быть выполнены как с прямым, так и с обратным движением стрелки. Вакуумметры выпускаются с диапазоном измерения от —1 до 0 кгс/см^2 (от —0,1 до 0 МПа). В применении имеются вакуумметры с верхним пределом измерения 760 мм рт. ст. (0,101 МПа).

Мановакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной отличаются от рассмотренного выше манометра в основном шкалой, которая выполняется у них двусторонней. Шкала, расположенная слева от нуля, служит для измерения вакуума в диапазоне от —1 до 0 кгс/см^2 (от —0,1 до 0 МПа), а справа от нуля находится шкала для измерения избыточного давления, которая выполняется с верхними пределами измерения от 0,6 до 24 кгс/см^2 (0,06—2,4 МПа).

Устройство манометров и вакуумметров повышенной точности, контрольных с одной стрелкой и образцовых в принципе ничем не отличается от прибора, показанного на рис. 10-3-4. Большая точность этих приборов, особенно образцовых, по сравнению с техническими приборами достигается главным образом тщательным изготовлением и применением материалов высокого качества.

Контрольные манометры и вакуумметры двухстрелочные имеют две трубчатые пружины, закрепленные в одном держателе и работающие одновременно от одного штуцера. Они имеют два передаточных механизма, две стрелки и две шкалы соответственно каждой пружине.

Механические самопишущие приборы давления с одновитковой трубчатой пружиной в практике технологического контроля на тепловых электростанциях распространения не получили. В других же отраслях промышленности они находят ограниченное применение.

При выборе шкалы прибора с одновитковой трубчатой пружиной необходимо, чтобы рабочий предел измерения избыточного

давления был не менее $^3/_4$ верхнего предела измерения при постоянном давлении и не менее $^2/_3$ верхнего предела измерения при переменном давлении (ГОСТ 2405-63).

10-4. Электроконтактные приборы и реле давления

Электроконтактные приборы и реле давления применяют при автоматизации технологических процессов в схемах сигнализации, устройствах тепловой защиты агрегатов и ряде других устройств. Электроконтактные приборы выпускают обычно с показывающим отсчетным устройством, поэтому они могут быть использованы одновременно для целей измерения и сигнализации избыточного или вакуумметрического давления. Реле (или сигнализаторы) давления для целей измерения не могут быть использованы, так как они не имеют отсчетных устройств.

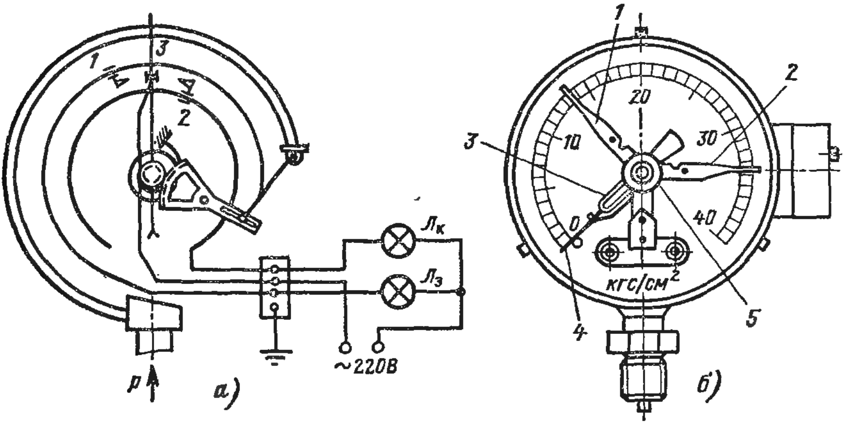


Рис. 10-4-1. Электроконтактный манометр типа ЭКМ.

а — схема прибора; *б* — внешний вид манометра.

Электроконтактные приборы. Приборы этого типа изготовляют в виде манометров, мановакуумметров и вакуумметров. На рис. 10-4-1 показаны принципиальная схема и внешний вид электроконтактного манометра типа ЭКМ. В этом приборе в качестве упругого чувствительного элемента используется одновитковая трубчатая пружина. По своему устройству прибор типа ЭКМ отличается от рассмотренного выше манометра (рис. 10-3-4) лишь наличием специальных электроконтактов *1* — *3*. Установка электроконтактов *1* и *2* может быть произведена на любые отметки рабочей части шкалы манометра вращением винта в головке *5*, находящейся на наружной стороне стекла (рис. 10-4-1,*б*).

Если измеряемое давление среды в объекте уменьшится и достигнет того минимального значения шкалы, на которое установлен контакт *1*, стрелка *4* с помощью контакта *3* замкнет цепь и включит лампу $Л_з$ определенного цвета, например зеленого. Если же давление среды увеличится до верхнего заданного значения, то стрелка с помощью контакта *3* замкнет контакт *2*, а следовательно, и цепь красной лампы $Л_к$.

Устройство электроконтактных мановакуумметров и вакуумметров ничем не отличается от рассмотренного манометра. Электроконтактные манометры ЭКМ выпускают с верхними пределами измерения от 1 до 1600 кгс/см² (0,1—160 МПа). Мановакуумметры типа ЭКМ изготовляют с верхним пределом измерения вакуумметрического давления до 1 кгс/см² (0,1 МПа), а избыточного давления — от 1 до 25 кгс/см² (0,1—2,5 МПа). Электроконтактные вакуумметры выпускают

с верхним пределом измерения до 1 кгс/см² (0,1 МПа). Разрывная мощность контактов 10 В · А при максимальном токе 1 А. Приборы типа ЭКМ выпускаются класса точности 2,5. Имеются модификации электроконтактных манометров, мановакуумметров и вакуумметров типа ВЭ-16РБ взрывобезопасного исполнения на те же верхние пределы измерения.

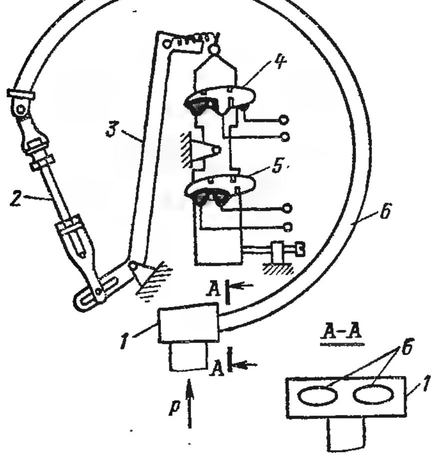


Рис. 10-4-2. Реле давления типа РДС.

Реле давления сигнальное типа РДС. На рис. 10-4-2 схематично показано устройство реле давления типа РДС. В этом реле в качестве упругого чувствительного элемента используются две одновитковые трубчатые пружины *6*, впаянные в общий держатель *1* и работающие одновременно от одного штуцера. Перемещение свободных концов этих пружин посредством тяги *2* и рычага *3* передается контактному устройству, состоящему из двух ртутных переключателей (нормально замкнутого *5* и нормального разомкнутого *4*). Регулировка настройки срабатывания по давлению осуществляется с помощью тяги и винта.

Диапазон настройки срабатывания по давлению от 5 до 25 кгс/см² (0,5—2,5МПа) с погрешностью ±0,25 кгс/см² (0,025 МПа). Разрывная мощность контактов 300 В · А.

10-5. Приборы давления с электрическими и пневматическими преобразователями

Приборы давления с электрическими и пневматическими преобразователями, или так называемые первичные приборы давления, получили широкое применение в различных отраслях промышленности для дистанционного измерения избыточного, вакуумметрического и абсолютного давления газа и жидкости, не агрессивных по отношению к сплавам на медной основе и углеродистым сталям.

Первичные приборы давления применяются в комплекте с вторичными приборами и автоматическими регуляторами, а приборы с унифицированным выходным сигналом постоянного тока используются также и с информационно-вычислительными машинами при создании АСУ ТП. Ниже рассмотрим приборы давления с электрическим и пневматическим выходными сигналами, широко применяемые в энергетике и других отраслях промышленности. Эти приборы относятся к группе унифицированной системы электрических и пневматических взаимозаменяемых приборов ГСП.

Первичные приборы типа МЭД. Эти приборы, выпускаемые заводом «Манометр», предназначены для измерения и непрерывного преобразования избыточного или вакуумметрического давления в унифицированный выходной сигнал переменного тока. Эти при-

боры (показывающие) изготовляются с отсчетными устройствами и без них в следующих модификациях: манометры с верхними пределами измерения избыточного давления от 1 до 1600 кгс/см² (от 0,1 до 160 МПа); вакуумметры с верхним пределом измерения вакуумметрического давления 1 кгс/см² (0,1 МПа); мановакуумметры с верхними пределами измерения вакуумметрического давления до 1 кгс/см² (до 0,1 МПа) и избыточного — от 0,6 до 24 кгс/см² (от 0,06 до 2,4 МПа).

В приборах МЭД применяется унифицированный взаимозаменяемый передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь с нормированной взаимной индуктивностью между первичной и вторичной цепями его 0—10 мГ (гл. 8). В зависимости от верхнего предела измерения давления в приборах МЭД применяют трубчатые пружины различной жесткости. Приборы МЭД выпускаются классов точности 1 и 1,5. Допускаемая в условиях эксплуатации температура окружающего воздуха — от 5 до 50°С при относительной влажности воздуха до 80%.

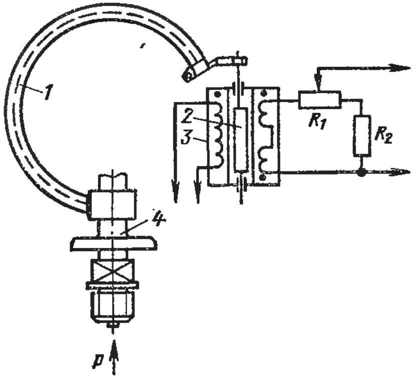


Рис. 10-5-1. Прибор давления типа МЭД.

На рис. 10-5-1 схематично показан первичный прибор типа МЭД без отсчетных устройств. Действие этого прибора основано на использовании деформации одновитковой трубчатой пружины *1*, свободный конец которой, связанный с сердечником *2* дифференциально-трансформаторного преобразователя *3*, перемещается пропорционально измеряемому давлению среды.

Изменение положения сердечника дифференциально-трансформаторного преобразователя вызывает изменение взаимной индуктивности между его обмотками, а следовательно, и электрических параметров (напряжения и фазы) сигнала на выходе прибора.

В приборах типа МЭД с отсчетными устройствами (показывающих) свободный конец трубчатой пружины, кроме того, соединен с помощью секторного передаточного механизма с показывающей стрелкой. Подвод измеряемого давления к прибору МЭД осуществляется через резьбовой штуцер держателя *4*. Для подключения к линии связи вторичного прибора применяют четырехштырьковый штепсельный разъем, который на рис. 10-5-1 не показан.

Приборы давления МЭД работают в комплекте с взаимозаменяемыми вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы КПД1, КВД1, КСД1, КСД2 и КСД3 с нормированным входным параметром 0—10 мГ. Следует отметить, что взаимозаменяемость приборов обеспечивает возможность работы одного вто-

ричного прибора (например, КПД1 или КВД1) с несколькими первичными приборами МЭД. В этом случае периодическое подключение приборов МЭД к вторичному прибору осуществляется с помощью переключателя.

Приборы давления с преобразователями, основанными на принципе компенсации магнитных потоков. Приборы давления, снабженные преобразователями с магнитной компенсацией, разработаны НИИТеплоприбором совместно с ВТИ и предназначены для измерения давления газа или жидкости [56]. Эти приборы, выпускаемые казанским заводом «Теплоконтроль» [58], изготовляются без отсчетных устройств в виде следующих первичных измерительных устройств: манометров абсолютного давления мембранных (МАДМЭ) с верхними пределами измерения абсолютного давления 0,1 и 0,6 кгс/см² (10 и 60 кПа); манометров мембранных (ММЭ) с верхними пределами измерения избыточного давления от 1,6 до 25 кгс/см² (от 0,16 до 2,5 МПа); манометров с трубчатой пружиной (МПЭ) с верхними пределами измерения избыточного давления от 25 до 600 кгс/см² (от 2,5 до 60 МПа). В приборах этого типа используется унифицированный передающий линейный преобразователь с магнитной компенсацией, рассмотренный выше (гл. 8).

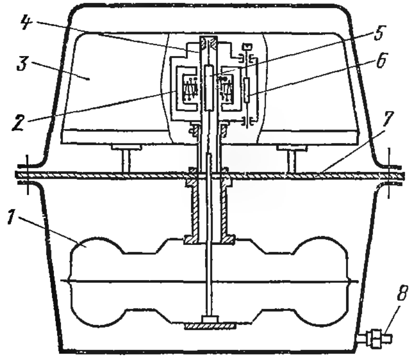


Рис. 10-5-2. Манометр мембранный типа ММЭ.

На рис. 10-5-2 показано устройство манометра мембранного электрического типа ММЭ в упрощенном виде. Манометр состоит из чувствительного элемента *1*, выполненного в виде мембранной коробки, передающего линейного преобразователя с магнитной компенсацией *2* и полупроводникового усилителя *3* типа УП-МК. На крышке *7* корпуса измерительного блока жестко укреплена разделительная трубка *4* из немагнитной нержавеющей стали. Внутри разделительной трубки находится магнитный плунжер *5*, который жестко связан с центром дна мембранной коробки. В приборе предусмотрена возможность перемещения преобразователя относительно магнитного сердечника, что позволяет производить первоначальную настройку нулевого значения выходного сигнала манометра. При эксплуатации манометра регулировка нулевого значения выходного сигнала производится с помощью корректора нуля *6*. Подвод измеряемого давления осуществляется через штуцер *8* внутрь корпуса измерительного блока. Штуцер выполняют с резьбой и снабжают гайкой и ниппелем.

Измеряемое давление среды преобразовывается мембранной коробкой в пропорциональное перемещение магнитного плунжера,

который создает магнитный управляющий поток и вызывает изменение намагниченности сердечников преобразователя. При этом возникает сигнал рассогласования в виде напряжения, который управляет выходным сигналом усилителя. Выходной сигнал постоянного тока с выхода усилителя поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в обмотку обратной связи преобразователя, которая создает магнитный поток, компенсирующий воздействие управляющего магнитного потока. Структурная и принципиальная схемы преобразователя приведены на рис. 8-7-1 и 8-7-2.

Манометры типа ММЭ имеют класс точности 1. Выходной сигнал 0—5 мА. Допускаемое сопротивление нагрузки — до 2,5 кОм. Условия эксплуатации: температура окружающего воздуха 0—60° С, допускаемая частота вибрации — не более 30 Гц, амплитуда вибрации — не более 0,2 мм. Питание от сети переменного тока 220 В, 50 Гц, потребляемая мощность — не более 5 В·А.

Манометр абсолютного давления типа МАДМЭ имеет класс точности 2,5; другие технические характеристики те же, что и для прибора ММЭ. Конструктивно он выполнен аналогично с манометром ММЭ. В качестве чувствительного элемента используется специальной конструкции мембранная коробка.

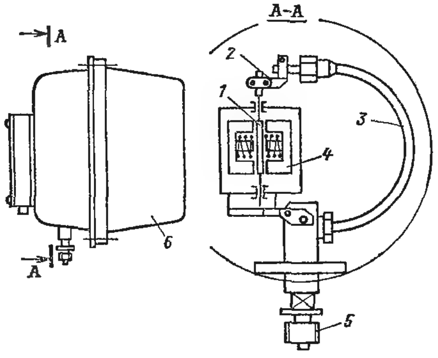


Рис. 10-5-3. Манометр пружинный типа МПЭ.

1 — магнитный плунжер; *2* — рычаг; *3* — трубчатая пружина; *4* — передающий преобразователь с магнитной компенсацией; *5* — резьбовой штуцер; *6* — внешний вид манометра.

Манометр пружинный электрический типа МПЭ показан в упрощенном виде на рис. 10-5-3. Принцип его действия не отличается от описанных выше приборов (ММЭ).

Манометры типа МПЭ выпускаются класса точности 1; другие технические характеристики аналогичны приведенным для прибора ММЭ.

Первичные приборы давления ММЭ, МАДМЭ и МПЭ могут работать в комплекте с миллиамперметрами, выполненными на базе автоматических показывающих или показывающих и самопишущих потенциометров (гл. 4), а также с другими типами миллиамперметров. Кроме того, эти приборы могут быть использованы для работы с автоматическими регуляторами и информационно-вычислительными машинами.

Приборы давления электрические с силовой компенсацией. Приборы давления электрические с силовой компенсацией, разработанные НИИтеплоприбором при участии завода «Манометр», по-

строены по блочному принципу с использованием унифицированного электросилового преобразователя, полупроводникового усилителя УП-20 и измерительных блоков с различными по назначению упругими чувствительными элементами.

Рассматриваемые приборы давления без отсчетных устройств с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0—5 или 0—20 мА изготавливаются заводом «Манометр» в виде следующих модификаций: тягомеров сильфонных (ТС-Э) с верхними пределами измерения вакуумметрического давления газа от 40 до 4000 кгс/м² (от 0,4 до 40 кПа); напоромеров сильфонных (НС-Э) с верхними пределами измерения избыточного давления газа от 40 до 4000 кгс/м² (от 0,4 до 40 кПа); тягонапоромеров сильфонных (ТНС-Э) с верхним пределом измерения избыточного и вакуумметрического давления газа от ±20 до ±2000 кгс/см² (от ±0,2 до ±20 кПа); вакуумметров сильфонных (ВС-Э) с верхним пределом измерения вакуумметрического давления газа от 0,25 до 1 кгс/см² (от 25 до 100 кПа); мановакуумметров сильфонных (МВС-Э) с диапазонами измерения избыточного и вакуумметрического давления газа от —1 ÷ 0,6 до —1 ÷ 24 кгс/см² (от —0,1 ÷ 0,06 до —0,1 ÷ 2,4 МПа); манометров абсолютного давления сильфонных (МАС-Э) с верхними пределами измерения абсолютного давления газа от 0,06 до 25 кгс/см² (от 0,006 до 2,5 МПа); манометров сильфонных (МС-Э) с верхним пределом измерения избыточного давления газа от 0,25 до 25 кгс/см² (от 0,025 до 2,5 МПа); манометров пружинных (МП-Э) с верхним пределом измерения избыточного давления газа и жидкости от 25 до 1000 кгс/м² (от 2,5 до 100 МПа); манометров пружинных сверхвысокого давления (МСв-Э) с верхним пределом измерения избыточного давления газа и жидкости от 1000 до 10 000 кгс/см² (от 100 до 1000 МПа). В манометрах типа МП-Э используются трубчатые пружины, показанные на рис. 10-2-9, а в приборах типа МСв-Э применяется прямолинейная трубчатая пружина с эксцентричным каналом (см. рис. 10-2-13). Все эти приборы давления выпускаются классов точности 0,6; 1 и 1,5, кроме манометров типа МАС-Э, имеющих классы точности 0,6; 1; 1,5 и 2,5 в зависимости от диапазона измерения.

Кроме перечисленных приборов давления электрических с силовой компенсацией завод «Манометр» выпускает манометры узкопредельные сильфонные с верхним пределом измерения избыточного давления газа и жидкости от 2,5 до 600 кгс/см² (от 0,25 до 60 МПа). Эти манометры выпускаются классов точности 0,25; 0,4; 0,6 и 1 в зависимости от диапазона измерения.

На рис. 10-5-4 приведена схема устройства напоромера сильфонного типа НС-Э, где *1* — сильфон измерительного блока; *2* — электросиловой линейный преобразователь, работающий в комплекте с полупроводниковым усилителем УП-20. Принцип работы электросилового преобразователя и схема усилителя описаны выше (гл. 8). Обозначения отдельных элементов и узлов электросилового преобразователя соответствуют принятым на рис. 8-8-1. Изме-

рительный блок манометра сильфонного МС-Э выполнен аналогично.

В тягомерах или вакуумметрах рычаг сильфона в измерительном блоке соединяется с верхним плечом Т-образного рычага *3*. В этом случае момент *M*, возникающий на Т-образном рычаге при измерении вакуумметрического давления, будет иметь то же направление, что и в манометрах или напоромерах, выполненных по схеме рис. 10-5-4. В этих приборах в зависимости от верхнего предела измерения избыточного или вакуумметрического давления применяются сильфоны с различными эффективными площадями.

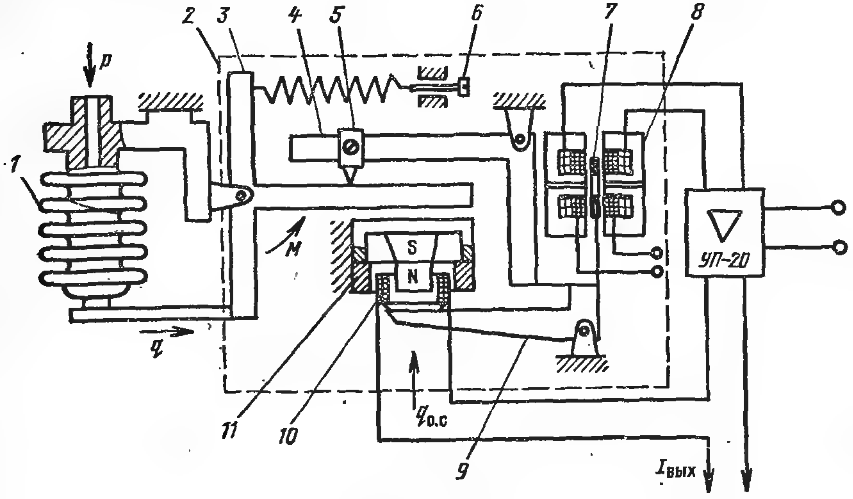


Рис. 10-5-4. Схема устройства сильфонного напоромера НС-Э.

Схема устройства манометра пружинного с силовой компенсацией МП-Э показана на рис. 10-5-5. Здесь неподвижный конец трубчатой пружины *1* закреплен в держателе, а подвижный — в рычаге, связанном через тягу с Т-образным рычагом *3* электросилового линейного преобразователя *2*. Назначение остальных элементов и узлов рассмотрено при описании схемы преобразователя (см. рис. 8-8-1).

Приборы давления пневматические с силовой компенсацией. Приборы давления пневматические с пневматическим выходным сигналом 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа), созданные НИИтеплоприбором при участии завода «Манометр», построены по блочному принципу с использованием унифицированного пневмосилового преобразователя, пневматического усилителя мощности и измерительных блоков с различными по назначению упругими чувствительными элементами.

Приборы давления пневматические, выпускаемые заводом «Манометр», изготовляются без отсчетных устройств в виде следующих первичных измерительных устройств: тягомеров сильфонных ТС-П;

напоромеров сильфонных НС-П; тягонапоромеров сильфонных ТНС-П; вакуумметров сильфонных ВС-П; мановакуумметров сильфонных МВС-П; манометров абсолютного давления сильфонных МАС-П; манометров сильфонных МС-П; манометров пружинных МП-П; манометров пружинных сверхвысокого давления МСв-П. Все эти приборы выпускаются на те же верхние пределы измерения (или диапазоны измерения) и тех же классов точности, что и соответствующие им по назначению приборы с электросиловой компенсацией.

Кроме перечисленных пневматических приборов завод «Манометр» выпускает манометры пневматические сильфонные узкопредельные на те же верхние пределы измерения давления газа и жидкости и тех же классов точности, что и узкопредельные манометры сильфонные с электросиловой компенсацией.

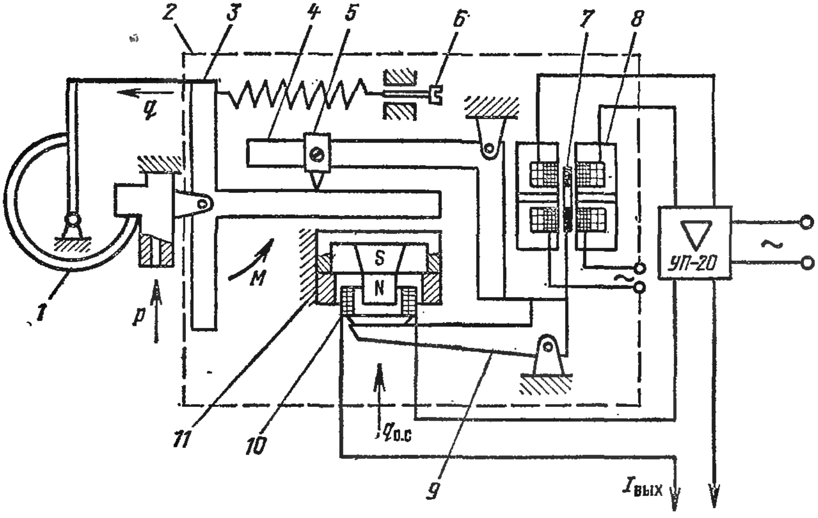


Рис. 10-5-5. Схема устройства пружинного манометра МП-Э.

На рис. 10-5-6 приведена схема устройства тягомера типа ТС-П, где *1* — сильфон измерительного блока, а *6* — пневмосиловой преобразователь. Принцип работы пневмосилового преобразователя и пневматического усилителя мощности (см. рис. 8-10-2) описан выше (гл. 8). Обозначения отдельных элементов и узлов пневмосилового преобразователя соответствуют принятым на рис. 8-10-1.

На рис. 10-5-7 показана схема устройства манометра абсолютного давления типа МАС-П. Измерительный блок *1* у этого прибора имеет два одинаковых сильфона с эффективной площадью 0,4 или 2 см² в зависимости от диапазона измерения абсолютного давления. Сильфон *14* вакуумирован и заварен, а в сильфон *13* подается измеряемое давление. Расстояния сильфонов от опоры рычага *3* при-

мерно одинаковы и подбираются таким образом, чтобы моменты, создаваемые сильфонами относительно опоры рычага, при изменении барометрического давления были бы одинаковы. Поскольку эти моменты направлены в противоположные стороны, то изменение барометрического давления не будет влиять на выходной сигнал прибора, определяемый только измеряемым абсолютным давлением. Обозначения других элементов и узлов пневмосилового преобразователя манометра соответствуют принятым на рис. 8-10-1.

Приборы давления пневматические могут работать в комплекте с вторичными показывающими или самопишущими приборами с диапазоном измерения 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа) и пневматическими регуляторами ГСП.

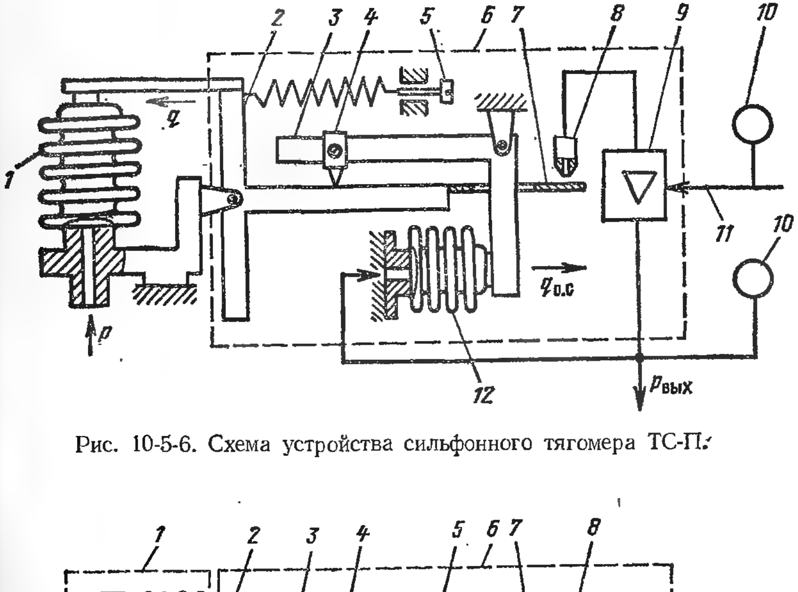


Рис. 10-5-6. Схема устройства сильфонного тягомера ТС-П.

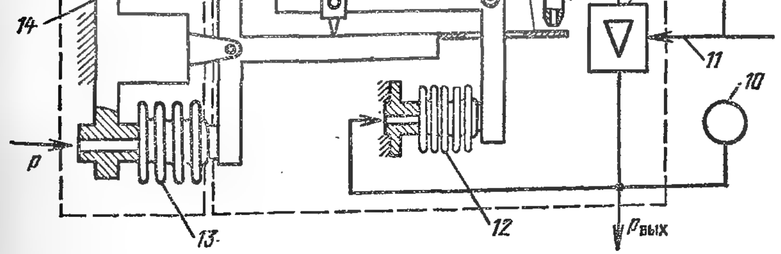


Рис. 10-5-7. Схема устройства манометра абсолютного давления МАС-П.

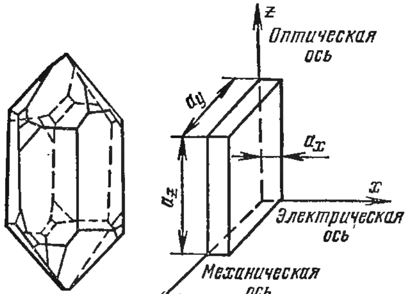
ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

Общие сведения. Электрические приборы, применяемые в технике для измерения давления различных сред, используются главным образом для исследовательских целей. В основу действия этих приборов положены различные физические явления, например возникновение электростатических зарядов при деформации некоторых кристаллов в определенном направлении, изменение электрического сопротивления проводников при воздействии измеряемого давления, изменение индуктивности или электрической емкости и т. д. Следует отметить, что емкостные приборы давления имеют весьма ограниченное применение вследствие малой чувствительности и зависимости характеристик от температуры.

11-1. Пьезоэлектрические манометры

Действие манометров этого типа основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда кристаллов (кварца, турмалина, титаната бария, сегнетовой соли и др.). Пьезоэлектрические манометры, использующие в качестве первичного преобразователя кварц (двуокись кремния SiO_2), нашли наибольшее практическое применение по сравнению с приборами, использующими другие кристаллы, благодаря существенным достоинствам кварца, который негигроскопичен, обладает большой механической прочностью, хорошими изоляционными качествами и независимостью пьезоэлектрических свойств от температуры сравнительно в широком интервале (20—400°С).



а) *б)*

Рис. 11-1-1. Кристалл кварца (*а*) и пластина кварца и ее оси (*б*).

У кристалла кварца (рис. 11-1-1, *а*) различают следующие оси: оптическую, проходящую через вершины кристалла; электрическую, перпендикулярную оптической и проходящую через ребра (их три со сдвигом в 120°); механическую (или нейтральную), которая расположена нормально к граням кристалла (их также три).

Если из кристалла кварца вырезать прямоугольную пластину (рис. 11-1-1, *б*) с гранями, параллельными осям (срез Кюри), и подвергнуть ее сжатию (или растяжению) вдоль электрической оси, то на гранях, перпендикулярных этой оси, появятся электростатические заряды, равные по значению и противоположные по знаку. При переходе от сжатия к растяжению и обратно знаки

зарядов меняются в соответствии с изменением знака силы, действующей вдоль электрической оси.

Значение Q_x заряда, возникающего вследствие действия силы F_x вдоль электрической оси, или давления p_x, действующего на площадь грани $S_x = a_y a_z$, равно:

$$Q_x = kF_x = kp_x S_x, \tag{11-1-1}$$

где k — пьезоэлектрическая постоянная или пьезоэлектрический модуль, Кл/Н.

Коэффициент k не зависит от размеров кристалла, однако его значения различны для разных пород кварца. Значение k для применяемого кварца равно $2{,}1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

Если при действующем давлении p_x весь заряд с граней S_x снять, а затем давление p_x изменить до p'_x, то на гранях вновь появится заряд Q'_x, равный:

$$Q'_x = k(p'_x - p_x) S_x. \tag{11-1-2}$$

При действии силы F_y вдоль механической оси заряды появляются также на гранях S_x. При этом знаки зарядов обратны тем, которые появляются при действии силы F_x того же знака, что и сила F_y. Таким образом, эффект растяжения кварца в направлении одной оси равнозначен эффекту сжатия его в направлении другой оси. Установлено, что значение заряда Q_y, появляющееся на гранях S_x в результате действия силы F_x, равно:

$$Q_y = -k \frac{a_y}{a_x} F_y. \tag{11-1-3}$$

Уравнение (11-1-3) показывает, что увеличение заряда Q_y при одной и той же силе F_y может быть достигнуто путем увеличения размера a_y или уменьшения размера a_x.

Уравнение (11-1-3) можно представить в следующем виде:

$$Q_y = -k \frac{a_y}{a_x} p_y S_y = -kp_y S_x, \tag{11-1-4}$$

где p_y — давление, действующее на площадь грани $S_y = a_x a_z$.

Действие силы F_z в направлении оптической оси не вызывает появления заряда.

Пьезоэлектрический эффект называется продольным, если заряд на гранях S_x возникает вследствие действия сил F_x, и поперечным, если заряды на тех же гранях S_x появляются под действием сил F_y.

Пьезокварцевые манометры, позволяющие измерять давление до 1000 кгс/см² (100 МПа) и выше, широко применяются при измерении быстропеременных давлений. При этом чем быстрее протекает исследуемый процесс, тем достовернее данный метод. Практически пьезоэлектрический эффект можно считать безынерционным и достаточно стабильным.

Устройство преобразователя пьезокварцевого манометра с продольным пьезоэффектом схематично показано на рис. 11-1-2. В кор-

пусе преобразователя расположены две кварцевые пластины 2 и 4, которые обращены друг к другу сторонами одинаковой полярности. Эти стороны кварцевых пластин прилегают к металлической контактной пластине 3. Вторые стороны кварцевых пластин прилегают к металлическим опорам 1 и 5 и через них электрически замыкаются на корпус преобразователя. Металлические опоры вместе со столбиком из кварца зажимаются между металлической плоской мембраной 9 и крышкой 6. Шарик, находящийся между крышкой 6 и верхней опорой, способствует равномерному распределению давления на поверхности кварца. Нижняя часть корпуса имеет штуцер 10 для соединения преобразователя с объектом измерения.

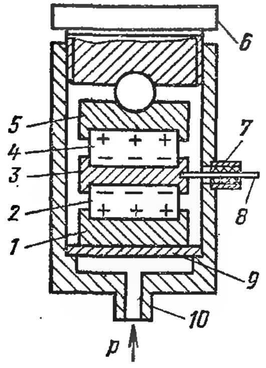


Рис. 11-1-2. Манометр с пьезокварцевым преобразователем.

При измерении давления положительный заряд, появляющийся на гранях кварцевых пластин, отводится на корпус, а отрицательный заряд с граней пластин снимается контактной пластиной 3 и с помощью провода 8 подается на измерительное устройство. Втулка из янтаря, установленная в канале 7, изолирует провод от корпуса преобразователя.

При измерении давления газа, например в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, необходимо учитывать, что преобразователь может нагреться до сравнительно высокой температуры. При этом хотя у кварца и не наблюдается заметного изменения пьезоэлектрической постоянной, однако чувствительность преобразователя может изменяться, так как вследствие наличия деформаций изменяется предварительное сжатие кварцевого столбика. Кроме того, нагрев корпуса вызывает быстрое прогорание мембраны. В силу указанных причин пьезокварцевые преобразователи для таких условий работы изготовляют с водяным охлаждением.

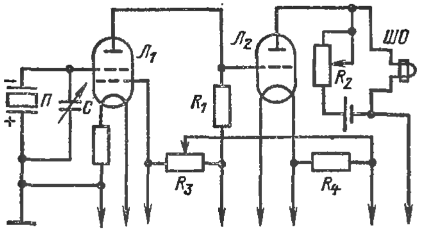


Рис. 11-1-3. Принципиальная схема пьезокварцевого манометра.

Чувствительность преобразователя можно повысить посредством увеличения активной площади мембраны, применения большего числа последовательно включенных кварцевых пластин или посредством применения удлиненной кварцевой пластины, работающей с использованием поперечного пьезоэффекта.

Основные трудности измерения давления при помощи пьезопреобразователя вызываются электростатической природой зарядов,

их малым значением, невозобновляемостью и тенденцией к быстрому стеканию через утечки.

В качестве примера рассмотрим упрощенную электрическую схему пьезокварцевого манометра, показанную на рис. 11-1-3. Отрицательный заряд, появляющийся на кварцевых пластинках преобразователя *П*, заряжает конденсатор *C* и управляющую сетку четырехэлектродной лампы $Л_1$ до некоторого отрицательного по отношению к катоду потенциала. Этот потенциал определяется значением давления, действующего на кварцевые пластины преобразователя, и суммарной емкостью сеточного контура лампы. Под влиянием изменения потенциала управляющей сетки изменяется анодный ток лампы. Этот ток усиливается второй лампой $Л_2$, на сетку которой подается напряжение, снимаемое с резистора R_1. В анодную цепь второй лампы включен шлейф магнитоэлектрического осциллографа (ШО). Параллельно этому шлейфу включена батарея с регулировочным резистором R_2, предназначенная для компенсации нулевого тока усилителя.

11-2. Манометры сопротивления

Действие манометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления веществ под действием внешнего избыточного давления. К числу таких веществ относятся полупроводники, платина, манганин, константан, вольфрам и ряд других металлов. Для целей измерения давления, а следовательно, и изготовления первичного преобразователя (или чувствительного элемента), как показали экспериментальные исследования, в наибольшей степени подходит манганин.

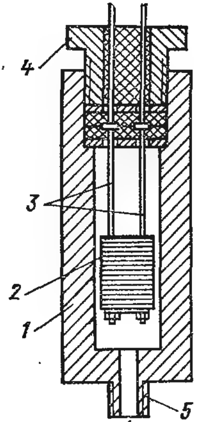


Рис. 11-2-1. Манометр с преобразователем из манганиновой проволоки.

Манганин имеет линейную зависимость приращения электрического сопротивления ΔR от давления $p_и$:

$$\Delta R = \kappa R p_и,$$

где κ — коэффициент изменения сопротивления манганина, см²/кгс.

Линейная зависимость сопротивления манганина подтверждается опытными данными вплоть до давления 30 000 кгс/см² (3000 МПа). Кроме того, он обладает очень малым температурным коэффициентом электрического сопротивления, что дает возможность не считаться при измерении давления с изменениями температуры окружающего прибор воздуха. Небольшая чувствительность преобразователя ограничивает применение этого манометра измерением сверхвысоких давлений (более 1000 кгс/см² или 100 МПа).

Коэффициент k манганина для разных партий лежит в интервале от $2{,}34 \cdot 10^{-6}$ до $2{,}51 \cdot 10^{-6}$ см²/кгс, и манометры с преобразователем из манганиновой проволоки требуют индивидуальной градуировки.

На рис. 11-2-1 показана схема манометра с преобразователем из манганиновой проволоки. В корпусе манометра *1* на двух металлических стержнях *3* смонтирован манганиновый резистор *2*. Металлические стержни, являющиеся одновременно выводными проводниками, электрически изолированы от корпуса преобразователя. Крепление стержней осуществляется посредством гайки *4*.

Герметичность соединения гайки *4* с корпусом преобразователя достигается уплотнением, состоящим из двух шайб и изоляционных прокладок. Ниппель *5* служит для присоединения преобразователя на месте его установки к объекту.

Стержни в верхней своей части имеют зажимы, служащие для присоединения преобразователя к измерительному прибору. Для измерения сопротивления манганиновой катушки преобразователя обычно применяют мосты, а при точных измерениях — потенциометры. Пределы допускаемой основной погрешности манометра с манганиновым резистором не превышают ±1%. При более тщательной градуировке прибора погрешность показаний может быть значительно уменьшена.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МАНОМЕТРЫ

12-1. Общие сведения

Дифференциальные манометры (дифманометры) применяют в различных отраслях промышленности для измерения перепада давления, расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве (гл. 14) и уровня жидкости, находящейся под атмосферным, избыточным или вакуумметрическим давлением (гл. 19). Кроме того, некоторые типы дифманометров используются в качестве тягомеров, напоромеров и тягонапоромеров.

Ниже рассматриваются выпускаемые дифманометры следующих типов: колокольные, кольцевые, поплавковые, мембранные и сильфонные. Эти приборы в зависимости от наличия (или отсутствия) устройства для отсчета и дистанционной передачи показаний (электрической, пневматической и др.) подразделяются на следующие разновидности:

1. Дифманометры с отсчетными устройствами, у которых перемещение чувствительного элемента (подвижных частей механизма), вызываемое действием давления или разности давлений, непосредственно или при помощи дополнительных устройств в самом приборе используется для показания или записи.

2. Дифманометры с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными

выходными сигналами переменного тока и составляющие с вторичными взаимозаменяемыми приборами отдельные измерительные комплекты.

3. Дифманометры с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами постоянного тока или пневматическим сигналом и предназначенные для работы с взаимозаменяемыми вторичными показывающими и самопишущими приборами и регуляторами, а дифманометры с выходным сигналом постоянного тока — с информационно-вычислительными машинами.

Указанные выше дифманометры или вторичные приборы, работающие в комплекте с ними, могут иметь дополнительные устройства для сигнализации, интегрирования и др.

Согласно ГОСТ 18140-77 предельные номинальные перепады давления дифманометров-расходомеров и дифманометров-перепадомеров или сумма предельных номинальных перепадов давления дифманометров-перепадомеров должны выбираться из ряда:

а) 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600 и 2500 кгс/м^2 (10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000, 6300, 10 000, 16 000 и 25 000 Па);

б) 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10 и 16 кгс/см^2 (0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0 и 1,6 МПа).

Верхние пределы измерений дифманометров-расходомеров, соответствующие предельным номинальным перепадам давления, должны выбираться из ряда

$$A = a10^n, \qquad (12\text{-}1\text{-}1)$$

где a — одно из чисел ряда: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; n — целое (положительное или отрицательное) число или нуль.

Нижние пределы измерений дифманометров-расходомеров должны составлять не более 30% верхних пределов измерений.

Верхние пределы измерений или сумма абсолютных значений пределов измерений дифманометров-перепадомеров должны соответствовать предельным номинальным перепадам давления или сумме предельных номинальных перепадов давления.

Верхние пределы измерений или сумма абсолютных значений пределов измерений дифманометров-уровнемеров должны выбираться из ряда: 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 2500, 4000 и 6300 см (0,25; 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40 и 63 м) высоты столба жидкости, уровень которой измеряют.

Предельные номинальные перепады давления или сумма предельных номинальных перепадов давления дифманометров-уравнемеров должны соответствовать верхним пределам измерений или сумме абсолютных значений пределов измерений с учетом плотности жидкости, уровень которой измеряют. Если дифманометры работают с разделительными сосудами, то необходимо также учитывать плотность разделительной жидкости.

Предельно допускаемые рабочие избыточные давления дифманометров должны соответствовать требованиям ГОСТ 18140-77.

Классы точности дифманометров должны выбираться из ряда: 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1; 1,5; 2,5 и 4. Класс точности 4 допускается только для дифманометров с верхними пределами измерений менее 10 кгс/м^2 (100 Па). Пределы допускаемой основной погрешности дифманометров классов точности 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2,5 и 4 определяются значениями $\pm 0,25$; $\pm 0,4$; $\pm 0,6$; $\pm 1,0$; $\pm 1,5$; $\pm 2,5$ и $\pm 4,0$% нормирующего значения измеряемой величины (соответственно).

Согласно ГОСТ 18140-77 за нормирующее значение измеряемой величины принимают:

верхний предел измерений по расходу — для дифманометров-расходомеров с равномерной по расходу шкалой (диаграммой) или выходным сигналом, пропорциональным расходу;

предельный номинальный перепад давления — для дифманометров-расходомеров с неравномерной по расходу шкалой (диаграммой) или выходным сигналом, пропорциональным перепаду давления;

предельный номинальный перепад давления — для дифманометров-перепадомеров (или уровнемеров), у которых номинальный перепад давления может принимать только положительное значение;

сумму абсолютных значений предельных номинальных перепадов давления — для дифманометров-уровнемеров (или перепадомеров), у которых номинальный перепад давления может принимать положительное или отрицательное значение.

Вариация показаний или значений выходных сигналов дифманометров указанных выше классов точности не должна превышать значения предела допускаемой основной погрешности. Зона нечувствительности дифманометров не должна превышать половины значения предела допускаемой основной погрешности.

По устойчивости к воздействию температуры и влажности окружающего воздуха дифманометры должны соответствовать требованиям ГОСТ 12997-76.

Изменения показаний или выходных сигналов дифманометров классов точности 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5 и 4 при отклонении температуры окружающего воздуха от нормальной температуры (например, 20±5°С) до любой температуры, например от 5 до 50°С на каждые 10°С, не должны превышать значений, выраженных в долях предела допустимой основной погрешности, соответственно 1,2; 1,0; 0,9; 0,8; 0,6; 0,5; 0,3 и 0,3.

Изменение показаний или выходных сигналов дифманометров класса точности 0,6 и дифманометров остальных классов точности не должно превышать соответственно половины и одной трети значения предела допускаемой основной погрешности при отклонении от номинального значения: напряжения на +10 и —15% (для дифманометров с нормируемым напряжением питания); тока на +10 и —15% (для дифманометров с нормируемым током питания); частоты на ± 1Гц (для дифманометров с нормируемой частотой питания переменного тока); давления воздуха на ±0,14 кгс/см² (0,014 МПа) — для дифманометров с нормируемым давлением питания.

Устойчивость дифманометров к механическим воздействиям и магнитным полям, динамические характеристики, смещение нуля под воздействием рабочего избыточного давления обычно устанавливаются в технической документации на конкретные дифманометры.

С другими техническими характеристиками дифманометров можно познакомиться в ГОСТ 18140-77.

Предельный номинальный перепад давления $\Delta p_н = p_1 - p_2$ дифманометров классов точности 0,25; 0,4; 0,5; 0,6 и 1 устанавливается при 20±2°С, а для дифманометров классов точности 1,5; 2,5 и 4 — при 20±5°С. При градуировке и поверке этих приборов «минусовая» камера сообщается с атмосферой, а перепад давления создается путем подачи воздуха под давлением, равным Δp, в «плюсовую» камеру. Номинальные перепады давления дифманометров определяются по показанию параллельно подключенного образцового манометра (микроманометра или другого прибора) в кгс/м² или в кгс/см².

12-2. Дифманометры колокольные

Дифманометры колокольные могут быть использованы для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве. Эти дифманометры можно применять также для измерения малых избыточных и вакуумметрических давлений газа, а также перепадов давления.

Наибольшее распространение из числа колокольных дифманометров получили приборы, использующие один колокол, плавающий в жидкости и перемещающийся под воздействием давления или разности давлений газа. Таким образом, перемещение колокола

может служить мерой измеряемого давления или перепада давления газа. Бывают колокольные дифманометры с двумя колоколами и двухжидкостные [59], но они распространения не получили.

В приборах с колоколом, свободно плавающим в жидкости, измеряемый перепад давления уравновешивается силой, возникающей вследствие увеличения силы тяжести при его подъеме. Этот способ уравновешивания обычно называют гидростатическим.

Уравновешивание измеряемого давления или перепада давления, воспринимаемого колоколом, может осуществляться с помощью специального груза или упругими силами винтовой пружины. Такой способ уравновешивания обычно называют механическим. Способ уравновешивания с помощью груза широкого распространения не получил и в приборах, выпускаемых в настоящее время, не реализуется.

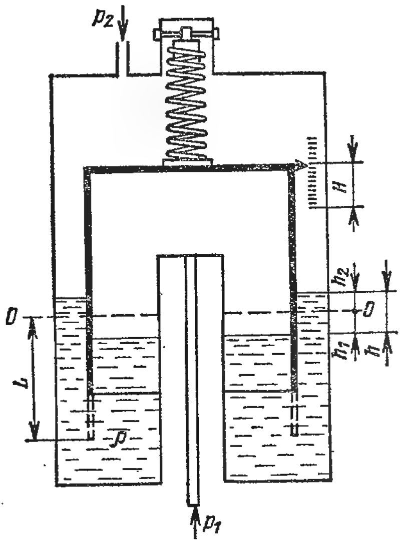


Рис. 12-2-1. Схема дифманометра колокольного.

У дифманометров колокольных с гидростатическим уравновешиванием колокол должен быть толстостенным и с достаточно большой рабочей площадью. В качестве разделительной жидкости в этих приборах применяют ртуть. Колокольные дифманометры этого типа в настоящее время не изготовляют и не применяют. У дифманометров колокольных с уравновешиванием упругими силами винтовой пружины колокола изготовляют тонкостенными, а в качестве разделительной жидкости применяют трансформаторное масло. Форма колоколов у дифманометров колокольной системы может быть разнообразной, но в большинстве случаев колокола выполняются цилиндрической формы, ход которых пропорционален измеряемому давлению или перепаду давления. Имеются также дифманометры с колоколами, внутренние стенки которых имеют профилированную форму, ход этих колоколов пропорционален квадратному корню из значения измеряемого перепада давления [59]. Дифманометры этого типа вследствие сложности изготовления профилированного колокола и необходимости применения в качестве разделительной жидкости ртути распространения не получили.

Рассмотрим колокольный дифманометр, схематически показанный на рис. 12-2-1. У этого прибора колокол, подвешенный на постоянно растянутой винтовой пружине, частично погружен в разделительную жидкость (трансформаторное масло), налитую в сосуд.

Колокол прибора будет находиться в равновесии, а уровень разделительной жидкости на отметке *0—0* до тех пор, пока под колоколом и в сосуде над ним давления одинаковы ($p_1 = p_2$). В этом случае равнодействующая сил, равная разности между силой тяжести колокола и гидростатическим давлением, уравновешивается силой упругости винтовой пружины:

$$\kappa_{п} L = G_{к} - L f g \rho_{р}, \qquad (12\text{-}2\text{-}1)$$

где $\kappa_{п}$ — жесткость винтовой пружины, $Н \cdot м^{-1}$; L — длина начального растяжения пружины, принимаемая равной начальной глубине погружения колокола, м; f — площадь поперечного сечения стенок колокола, $м^2$; $\rho_{р}$ — плотность разделительной жидкости, $кг \cdot м^{-3}$; $G_{к}$ — сила тяжести колокола, Н; g — местное ускорение свободного падения, $м \cdot с^{-2}$.

Для дифманометров с тонкостенным колоколом можно пренебречь гидростатическим давлением и принять в уравнении (12-2-1) площадь поперечного сечения колокола $f \approx 0$ вследствие ее малости. Для этого случая уравнение (12-2-1) принимает вид:

$$\kappa_{п} L = G_{к}. \qquad (12\text{-}2\text{-}2)$$

При возникновении разности давлений $p_1 - p_2$ ($p_1 > p_2$) равновесие сил, приложенных к колоколу, нарушается. При этом появляется подъемная сила от перепада давления, направленная вверх, которая будет перемещать колокол в том же направлении. Это в свою очередь вызовет возникновение противодействующей силы, обусловленной изменением упругих сил винтовой пружины вследствие ее деформации. Когда подъемная сила сделается равной по своему значению противодействующей силе, то колокол, переместившись на высоту H, займет новое положение равновесия.

Уравнение, определяющее новое состояние равновесия колокола, а вместе с тем и устанавливающее зависимость между измеряемой разностью давления $p_1 - p_2$ и значением H, имеет вид:

$$(p_1 - p_2) F_{в} = G_{к} - \kappa_{п} (L - H)$$

или с учетом уравнения (12-2-2)

$$H = \frac{F_{в}}{\kappa_{п}} (p_1 - p_2), \qquad (12\text{-}2\text{-}3)$$

где $F_{в}$ — внутренняя площадь колокола, $м^2$.

Из уравнения (12-2-3) следует, что для приборов с тонкостенным колоколом значение H не зависит от плотности разделительной жидкости, но плотность определяет тот максимальный перепад $hg\rho_{р}$, который может быть измерен данным прибором. Таким образом, при применении колокольного дифманометра этого типа наибольший измеряемый им перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$ можно принять равным предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_{н}$ прибора.

Уравнение, определяющее чувствительность рассматриваемого дифманометра, имеет вид:

$$s = \frac{H}{p_1 - p_2} = \frac{F_в}{\kappa_п}. \qquad (12\text{-}2\text{-}4)$$

Таким образом, изменяя жесткость пружины и внутреннюю площадь колокола, можно изменять чувствительность прибора, а следовательно, и верхний предел измерения.

Следует отметить, что изменение показаний дифманометра с тонкостенным колоколом при отклонении температуры окружающего воздуха от нормальной температуры до любой температуры от 5 до 50°С очень мало и им можно пренебречь. Это является большим преимуществом приборов данного типа.

Изменение верхних пределов измерений у дифманометров колокольных достигается сменой пружин и колокола, причем для перекрытия всех рабочих диапазонов от 0 до 100 кгс/м² (от 0 до 1000 Па) обычно бывает достаточно иметь два размера колоколов.

Для ознакомления с устройством колокольных дифманометров в качестве примера рассмотрим выпускаемый в настоящее время Ивано-Франковским приборостроительным заводом дифманометр колокольный типа ДКО (модель 3702), схематично показанный на рис. 12-2-2, в котором разность давлений, воспринимаемая колоколом, уравновешивается упругими силами винтовой пружины. Дифманометр этого типа, выпускаемый без отсчетных устройств, снабжен дифференциально-трансформаторным передающим преобразователем (гл. 8).

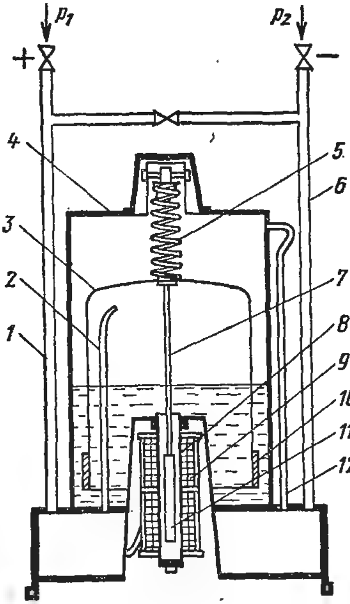


Рис. 12-2-2. Дифманометр колокольный типа ДКО.

В рассматриваемом приборе тонкостенный стальной колокол *3*, подвешенный на винтовой пружине *5*, плавает в разделительной жидкости (трансформаторном масле), налитой в сосуд *4*. Трансформаторное масло отделяет «плюсовую» камеру (под колоколом) от «минусовой» (над колоколом). Для понижения центра тяжести колокола в нижней его части прикреплен кольцевой груз *10*, который при перемещении колокола остается всегда погруженным в масло.

Дифференциально-трансформаторный преобразователь *9* закреплен на разделительной трубке *8*, выполненной из нержавеющей

немагнитной стали. Внутри разделительной трубки находится сердечник *11*, жестко связанный с колоколом с помощью стержня *7*, выполненного из немагнитной стали.

Дифманометр имеет два запорных вентиля для включения и выключения прибора и один уравнительный вентиль. При работе прибора большее (или избыточное) давление p_1 подается через вентиль, обозначенный знаком +, и трубку *1* в запасную камеру (ловушку), а затем по трубке *2* — в пространство под колоколом. Меньшее (или вакуумметрическое) давление p_2 через вентиль, обозначенный знаком —, и трубку *6* поступает во вторую запасную камеру (ловушку) и через трубку *12* подается в пространство над колоколом. Под действием измеряемой разности давлений $p_1 - p_2$ колокол и жесткосвязанный с ним сердечник дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещаются до тех пор, пока усилие от приложенной к колоколу разности давлений не уравновесится упругими силами винтовой пружины. Перемещение сердечника приводит к изменению взаимной индуктивности между первичной и вторичной цепями преобразователя, а вместе с тем и к изменению выходного сигнала.

Если измеряемый перепад давления будет превышать предельное номинальное значение, повреждения дифманометра не произойдет, так как при больших и длительных перегрузках разделительная жидкость частично сбрасывается в запасные камеры. Если будет иметь место такой случай, то необходимо выключить прибор, слить масло из запасных камер, восстановить уровень масла в приборе и произвести его поверку.

Заполнение прибора маслом и слив его осуществляются через отверстия, закрытые винтовыми пробками, которые на рис. 12-2-2 не показаны.

Дифманометры колокольные типа ДКО-3702 выпускаются с верхними пределами измерений, соответствующими предельным номинальным перепадам давления или сумме предельных номинальных перепадов давления, лежащих в интервале от 10 до 100 кгс/м² (от 100 до 1000 Па). Предельно допускаемое рабочее избыточное давление дифманометров колокольных 2,5 кгс/см² (0,25 МПа). Дифманометр ДКО-3702 имеет класс точности 1. Если дифманометр отградуирован вместе с вторичным прибором, то пределы допускаемой основной погрешности показаний не превышают ±1,5% нормирующего значения измеряемой величины.

Дифманометры колокольные позволяют измерять расход находящегося при низком избыточном давлении газа в комплекте с вторичным прибором, снабженным квадратичным кулачком, и сужающим устройством при малых перепадах давления. Эти дифманометры используются также в качестве тягомеров, напоромеров и тягонапоромеров.

Дифманометры ДКО-3702 работают в комплекте с вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы КПД1, КВД1, КСД2 и КСД3 с нормированной взаимной индуктив-

ностью между первичной и вторичной цепями дифтрансформатора 10—0—10 Мг, дифманометры колокольные выпускаются также и с ферродинамическими преобразователями (гл. 8), например типа ДКОФМ [17].

12-3. Дифманометры кольцевые

Дифманометры кольцевые применяют в промышленности для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве. Дифманометры этого типа используются также для измерения малого вакуумметрического и избыточного давления газа.

Схема дифманометра кольцевого показана на рис. 12-3-1. Дифманометр представляет собой замкнутое полое кольцо, разделенное

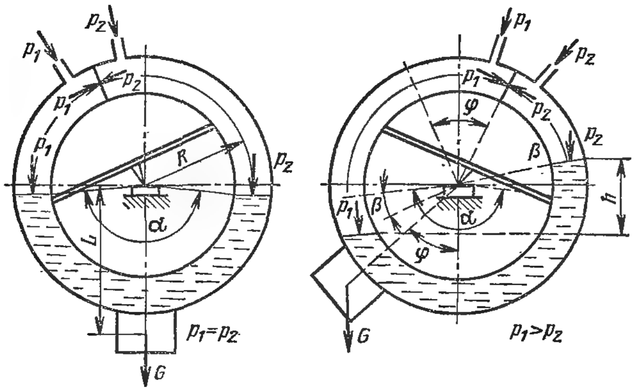


Рис. 12-3-1. Схема дифманометра кольцевого.

вверху непроницаемой перегородкой, а в нижней своей части на угол, равный α, заполненное разделительной жидкостью (водой или трансформаторным маслом). Кольцо может поворачиваться на некоторый угол φ (обычно 40—50° С) около оси, перпендикулярной плоскости окружности. Осью кольца является опорная призма (одна или две), расположенная в центре кольца и опирающаяся на стальную подушку (одну или две), заделанную в кронштейне, который на схеме не показан. К нижней части кольца прикреплен груз G, который создает противодействующий момент и определяет максимальное значение угла поворота кольца при заданном верхнем пределе измерения разности давлений.

Давления p_1 и p_2 к обеим полостям кольца, образованным перегородкой и разделительной жидкостью, подводятся посредством гибких резиновых трубок. Противодействующий момент, создаваемый резиновыми трубками, мал и не оказывает существенного влияния на угол поворота кольца. Подвижная система дифманометра до заполнения кольца разделительной жидкостью и снятом грузе G балансируется с помощью специальных грузов так, чтобы центр тяжести подвижной системы совпадал с осью вращения. На схеме

кольцевого дифманометра (рис. 12-3-1) балансирные грузы не показаны.

Кольцо дифманометра будет находиться в равновесии до тех пор, пока в обеих его полостях давление одинаково, т. е. $p_1 = p_2$. Если p_1 будет больше p_2, то под действием разности давлений независимо от движения кольца разделительная жидкость в нем переместится на угол β и, таким образом, действующая на жидкость разность давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ будет уравновешиваться столбом жидкости h, т. е. $\Delta p = hg(\rho - \rho_c)$, где ρ и ρ_c — плотности соответственно разделительной жидкости и среды, находящейся над жидкостью. При этом действующая на перегородку кольцевой трубки разность давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ создает движущую силу. Эта сила ΔpF, приложенная в центре тяжести перегородки, находящейся на расстоянии R от оси вращения кольца, будет создавать вращающий момент

$$M_в = \Delta pFR, \tag{12-3-1}$$

благодаря которому кольцевая трубка повернется на некоторый угол φ.

Противодействующий момент $M_п$ создается силой тяжести груза и определяется уравнением

$$M_п = GL \sin \varphi. \tag{12-3-2}$$

Для равновесия кольца необходимо, чтобы существовало равенство моментов $M_в = M_п$. Отсюда получаем уравнение, выражающее зависимость угла поворота кольца от измеряемой разности давлений:

$$\sin \varphi = \frac{\Delta pFR}{GL} \tag{12-3-3}$$

или

$$\Delta p = \frac{GL}{FR} \sin \varphi, \tag{12-3-4}$$

где L — расстояние от оси вращения кольца до центра тяжести груза; F — площадь поперечного сечения кольца (площадь перегородки).

Из полученных уравнений вытекает, что угол поворота кольца φ зависит от размеров кольца: чем больше F и R, тем больше угол поворота кольца. При постоянных значениях Δp, R, F и L угол поворота кольца зависит от силы тяжести груза G: чем меньше сила тяжести груза, тем больше угол поворота кольца. Изменение верхнего предела измерения разности давлений осуществляется в ряде случаев путем изменения силы тяжести груза G, и для этого груз делают составным из отдельных пластин. Верхний предел измерения кольцевого дифманометра можно также менять изменением значения L. Этот метод также находит применение в приборах, выпускаемых отечественными приборостроительными заводами.

Из вышеизложенного также следует, что угол поворота кольца дифманометра не зависит от плотности разделительной жидкости

и плотности среды, находящейся над ней, и температурный коэффициент кольцевого дифманометра с замкнутым кольцом практически равен нулю.

Однако плотность разделительной жидкости при заданных размерах кольца определяет верхний предел измерения разности давлений, которая может быть измерена данным дифманометром. Увеличить этот верхний предел измерения разности давлений при данной разделительной жидкости и при тех же размерах кольца не представляется возможным.

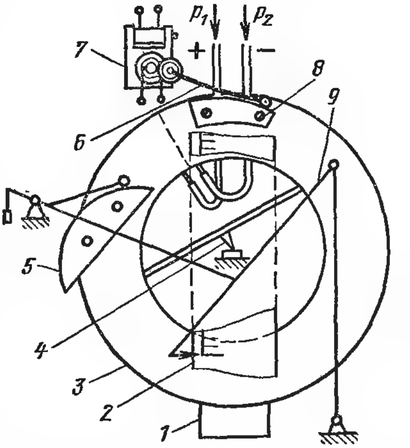


Рис. 12-3-2. Дифманометр кольцевой типа ДК-Ф.

1 — груз; *2* — циферблат; *3* — кольцо прямоугольного сечения; *4* — призменные опоры; *5* — лекало; *6* — рычаг с шестеренчатой передачей; *7* — ферродинамический преобразователь ПФ-2; *8* — лекало; *9* — рычажная система с указателем.

Как видно из полученных уравнений, шкала кольцевого дифманометра, градуированная в единицах давлений, будет неравномерной. Для получения равномерной шкалы прибора в передаточный механизм отсчетного устройства и преобразователя вводят лекальные пластины нужного профиля (рис. 12-3-2). Профиль лекала прибора со шкалой, градуированной в единицах давления, будет отличаться от профиля лекала дифманометра, предназначенного для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве. Профиль лекала дифманометров-расходомеров выполняется так, чтобы прибор показывал не перепад давления $(p_1 - p_2)$, а корень квадратный из перепада, т. е. величину, прямо пропорциональную расходу (гл. 14). В этом случае шкала прибора, градуированная в единицах расхода, получается равномерной.

Дифманометры кольцевые изготовляются с отсчетными устройствами или без них и снабжаются одним или двумя передающими ферродинамическими преобразователями. Эти дифманометры могут быть использованы для работы в комплекте с одним или двумя вторичными ферродинамическими приборами (гл. 8).

Дифманометры ДК-Ф с кольцом, изготовленным из стали, и с резиновыми подводящими трубками рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление не более 0,25 кгс/см^2 (0,025 МПа).

Кольцевые дифманометры-расходомеры ДК-Ф выпускаются на предельные номинальные перепады давления 40, 63, 100 и 160 кгс/м^2 (400, 630, 1000 и 1600 Па). Дифманометры ДК-Ф выпускаются также в качестве тягомеров, напоромеров и тягонапоромеров. Тягомеры и напоромеры имеют те же верхние пределы измерения, что и диф-

манометры-расходомеры ДК-Ф. Тягонапоромеры выпускаются с верхними пределами измерения избыточного и вакуумметрического давлений ±20 кгс/м² (±200 Па).

12-4. Дифманометры поплавковые

Дифманометры поплавковые изготовляют по типу жидкостных чашечных приборов, рассмотренных выше. Сосуды поплавковых дифманометров располагают обычно U-образно. У дифманометров этого типа измеряемый перепад давления уравновешивается давлением столба рабочей жидкости (ртути или трансформаторного масла), залитой в прибор. Измерение высоты этого столба осуществляется с помощью поплавка, передающего положение уровня рабочей жидкости в одном из сосудов на отсчетное устройство. Передача хода от поплавка к отсчетному устройству может быть осуществлена механическим путем или с помощью электрического преобразователя на вторичный показывающий (самопишущий) прибор. У дифманометров с масляным заполнением поплавок выполняют пустотелым.

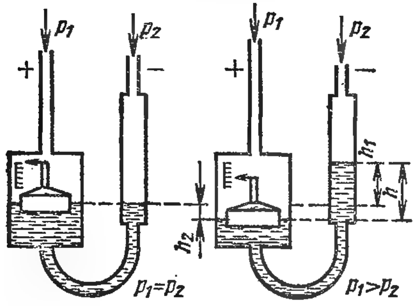


Рис. 12-4-1. Схема дифманометра поплавкового.

Дифманометры с ртутным заполнением предназначены для измерения: расхода жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве; перепада давления жидкости и газообразных сред; уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением.

Рассмотрим принципиальную схему дифманометра поплавкового с цилиндрическими сосудами, расположенными U-образно (рис. 12-4-1). Здесь большее давление p_1 подается в широкий (плюсовый) сосуд, а меньшее p_2 действует на поверхность рабочей жидкости другого сосуда, называемого минусовым или сменным. Для получения необходимой перестановочной силы диаметр поплавка должен иметь достаточные размеры. Диаметр поплавка в свою очередь определяет оптимальные размеры площади поперечного сечения сосуда, в котором он находится. Размеры минусового сосуда (диаметр и высота) обычно выбираются в зависимости от измеряемого перепада давления.

Таким образом, изменяя у поплавковых дифманометров этого типа только размеры минусового сосуда, представляется возможность менять верхние пределы измерений в широком интервале от 0,063 до 1,0 кгс/см² (от 0,0063 до 0,10 МПа), что является большим достоинством поплавковых дифманометров с сосудами, расположенными U-образно.

Под действием измеряемой разности давлений $p_1 - p_2$ рабочая жидкость в минусовом (сменном) сосуде поднимается на высоту h_1, а в широком (плюсовом) сосуде опустится на высоту h_2. Тогда разность уровней рабочей жидкости в сосудах будет равна:

$$h = h_1 + h_2. \qquad (12\text{-}4\text{-}1)$$

Если f — площадь сечения сменного сосуда, а F — широкого сосуда, то равенство объемов дает:

$$h_1 f = h_2 F,$$

откуда

$$h_1 = h_2 \frac{F}{f} = h_2 \frac{D^2}{d^2}, \qquad (12\text{-}4\text{-}2)$$

где D — внутренний диаметр широкого сосуда, м; d — внутренний диаметр сменного сосуда, м.

Уравнение равновесия рабочей жидкости в дифманометре имеет вид:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = hg(\rho_р - \rho_в), \qquad (12\text{-}4\text{-}3)$$

где $\rho_р$ — плотность рабочей жидкости, кг/м^3; $\rho_в$ — плотность вещества, находящегося над рабочей жидкостью, кг/м^3.

Из уравнений (12-4-1) и (12-4-2) следует, что

$$h = h_2\left(1 + \frac{D^2}{d^2}\right), \qquad (12\text{-}4\text{-}4)$$

откуда

$$h_2 = h \frac{d^2}{d^2 + D^2}. \qquad (12\text{-}4\text{-}5)$$

Подставляя (12-4-4) в уравнение (12-4-3), получаем:

$$\Delta p = h_2 g(\rho_р - \rho_в)\left(1 + \frac{D^2}{d^2}\right), \qquad (12\text{-}4\text{-}6)$$

откуда

$$h_2 = \frac{\Delta p}{g(\rho_р - \rho_в)}\left(\frac{d^2}{d^2 + D^2}\right). \qquad (12\text{-}4\text{-}7)$$

Если считать, что поплавок разгружен от действия сил трения в механизме прибора и сил поверхностного натяжения жидкости, то высота перемещения уровня жидкости в широком сосуде h_2 будет одновременно являться и высотой хода поплавка.

Решая уравнение (12-4-4) относительно d, получаем:

$$d = D\sqrt{\frac{h_2}{h - h_2}}. \qquad (12\text{-}4\text{-}8)$$

Значение h, соответствующее предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_н$ дифманометра, в общем случае выражается формулой

$$h = \frac{\Delta p_н}{g(\rho_р - \rho_в)}. \qquad (12\text{-}4\text{-}9)$$

Если $\rho_в \leqslant 0{,}001\,\rho_р$, то плотностью $\rho_в$ можно пренебречь вследствие ее малости.

Решая совместно уравнения (12-4-1) и (12-4-5) относительно h_1, получаем формулу, позволяющую приближенно определить высоту сменного сосуда, в следующем виде:

$$h_1 = h - h_2 = h\frac{D^2}{d^2 + D^2}. \qquad (12\text{-}4\text{-}10)$$

Уравнениями (12-4-8) и (12-4-10) обычно пользуются для расчета сменного (минусового) сосуда поплавковых дифманометров, выполняемых по схеме, показанной на рис. 12-4-1.

Далее уточним, в каких случаях при применении поплавкового дифманометра наибольший измеряемый им перепад давления Δp можно принять равным предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_н$ дифманометра.

Предельный номинальный перепад давления поплавкового дифманометра согласно выражению (12-4-3) равен:

$$\Delta p_н = 0{,}102 g h_н (\rho_р - \rho_в), \qquad (12\text{-}4\text{-}11)$$

откуда

$$h_н = \frac{\Delta p_н}{0{,}102 g (\rho_р - \rho_в)}, \qquad (12\text{-}4\text{-}12)$$

где $h_н$ — предельная номинальная разность уровней рабочей жидкости в сосудах дифманометра, м; g — местное ускорение свободного падения, м/с^2; 0,102—множитель для перевода значения перепада давления, выраженного в Па, в значение, выраженное в кгс/м^2.

При работе поплавкового дифманометра наибольший измеряемый перепад давления равен:

$$\Delta p = \Delta p_н - 0{,}102 g h_н (\rho'_в - \rho_в) + 0{,}102 g h_н (\rho'_р - \rho_р), \qquad (12\text{-}4\text{-}13)$$

где $\rho'_р$ и $\rho'_в$ — плотность соответственно рабочей жидкости и среды над ней при температуре 20°С и давлении p_1.

Подставляя в (12-4-13) $h_н$ (12-4-12), после несложных преобразований в общем случае будем иметь:

$$\Delta p = \Delta p_н \frac{\rho'_р - \rho'_в}{\rho_р - \rho_в}. \qquad (12\text{-}4\text{-}14)$$

При градуировке и поверке дифманометров «минусовая» камера сообщается с атмосферой, а перепад давления создается путем подачи воздуха под давлением, равным $\Delta p_н$, в «плюсовую» камеру. Поэтому для поплавковых дифманометров плотностью воздуха $\rho_в$ можно пренебречь, так как $p_в \ll \rho_р$, и формула (12-4-14) примет вид:

$$\Delta p = \Delta p_н \frac{\rho'_р - \rho'_в}{\rho_р}. \qquad (12\text{-}4\text{-}15)$$

Для дифманометров поплавковых с ртутным и масляным заполнением можно пренебречь сжимаемостью ртути и масла ($\rho'_р = \rho_р$) и уравнение (12-4-15) написать в следующем виде:

$$\Delta p = \Delta p_н \left(1 - \frac{\rho'_в}{\rho_р}\right). \qquad (12\text{-}4\text{-}16)$$

Этой формулой можно пользоваться для вычисления наибольшего измеряемого перепада давления Δp по предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_н$ дифманометров поплавковых, заполненных ртутью, над которой находится ве-

щество (кроме воды) плотностью $\rho'_в > 14$ кг/м³, или маслом, над которым находится газ плотностью $\rho'_в > 0{,}9$ кг/м³.

Как показывают расчеты, при применении поплавковых дифманометров, заполненных ртутью, над которой находится вода, сжимаемость воды можно не учитывать, если одновременно не учитывать сжимаемость ртути. В этом случае

$$\Delta p = \Delta p_н \left(1 - \frac{\rho_в}{\rho_р}\right) = 0{,}9263 \Delta p_н, \tag{12-4-17}$$

где $\rho_в$ и $\rho_р$ — плотность соответственно воды и ртути при атмосферном давлении и температуре 20°С.

При применении (12-4-17) погрешность при вычислении наибольшего измеряемого перепада давления Δp за счет влияния сжимаемости ртути и воды при давлениях до 400 кгс/см² (40 МПа) не превышает 0,03%.

Если дифманометр заполнен ртутью, над которой находится газ плотностью $\rho'_в \leqslant 14$ кг/м³, или маслом, над которым находится газ плотностью $\rho'_в \leqslant 0{,}9$ кг/м³, то

$$\Delta p = \Delta p_н. \tag{12-4-18}$$

Если предельный номинальный перепад давления $\Delta p_н$ выражен в кгс/см², то в формулах (12-4-16) — (12-4-18) следует подставлять значение $\Delta p_н \cdot 10^4$.

Полученные формулы для определения Δp не могут быть использованы, если поплавковые дифманометры применяют с разделительными сосудами, не удовлетворяющими указанным в гл. 14 требованиям.

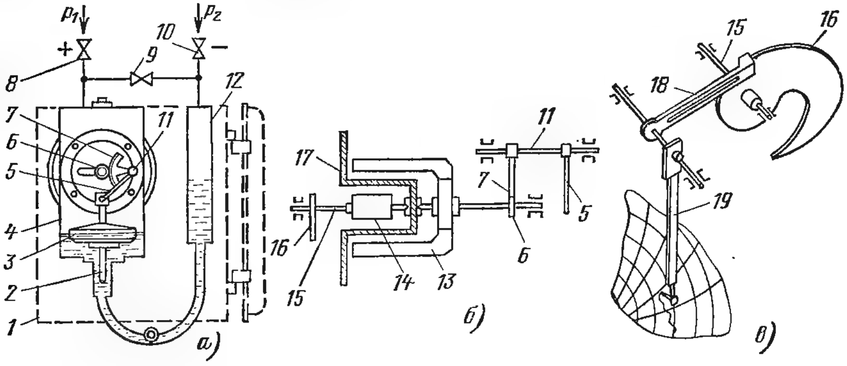


Рис. 12-4-2. Дифманометр поплавковый типа ДП-710Р.

Рассмотрим некоторые типы поплавковых дифманометров. На рис. 12-4-2 показана схема устройства самопишущего поплавкового дифманометра-расходомера с ртутным заполнением типа ДП-710Р. Прибор состоит из поплавкового плюсового *4* и сменного минусового *12* сосудов, соединенных U-образно. Меняя сменный сосуд, можно изменять предельные номинальные перепады давления $\Delta p_н$ для данного типа прибора в пределах следующих значений: 630; 1000; 1600; 2500 кгс/м² (6300; 10 000; 16 000; 25 000 Па) и 0,40; 0,63; 1,00 кгс/см² (0,040; 0,063; 0,100 МПа). Если этим предельным номинальным перепадам давления присвоить семь порядковых номеров, то номер перепада давления будет соответствовать номеру сменного

сосуда. Диаметр плюсового сосуда этих дифманометров равен 78,0 мм, а высота полного хода поплавка — 35,25 мм.

В рассматриваемом приборе движение поплавка *3* передается рычажно-секторному механизму *5* и *7*, преобразующему линейное перемещение поплавка в угловое перемещение шестерни *6*. Связь этого механизма, находящегося в сосуде *4* под рабочим давлением, с отсчетным устройством, расположенным в корпусе прибора *1* под атмосферным давлением, осуществляется с помощью шестерни *6* магнитной муфты (рис. 12-4-2, *б*).

Магнитная муфта состоит из ведущего магнитопровода П-образной формы *13*, ведомого ромбовидного постоянного магнита *14* и разделяющего их стакана *17*, выполненного из немагнитного материала. Магнитопровод *13* имеет общую ось с шестерней *6*, находящейся в зацеплении с сектором *7*, сидящем на оси *11*. Ось *11* является одновременно и осью рычага *5*, связанного с поплавком (рис. 12-4-2, *а*). На оси *15*, являющейся одновременно и осью ведомого ромбового магнита, жестко насажено лекало *16*, профиль которого рассчитан по квадратичной зависимости.

На рис. 12-4-2, *в* показан самопишущий механизм прибора, предназначенного для измерения расхода вещества. По профилю лекала *16*, насаженного на оси *15* магнитной муфты, скользит щуп *18*, на оси которого жестко насажено перо *19* для непрерывной записи показаний прибора на дисковой диаграммной бумаге. Привод диаграммы осуществляется от синхронного двигателя, а у некоторых модификаций приборов — от часового механизма. На оси щупа может быть закреплен кривошип, который соединяют с рычагом интегратора. Этот кривошип используется также для передачи угла поворота щупа к трибко-секторному механизму показывающего дифманометра.

Дифманометр снабжен предохранительным клапаном *2* (рис. 12-4-2, *а*), который исключает возможность выброса ртути из прибора при одностороннем плюсовом давлении. Прибор включается в работу с помощью вентилей *8* и *10*, которые имеют устройство для продувки соединительных линий. Для выравнивания давления в сосудах при пуске прибора или поверке его на нуль служит уравнительный вентиль *9*.

Дифманометры, предназначенные для измерения разности давлений и уровня жидкости, лекалом не снабжаются. У этих приборов на ось *15* магнитной муфты насаживается шестерня, которая с помощью сектора и четырехзвенника сочленяется с держателем (мостиком) пера.

Некоторые модификации дифманометров поплавковых могут быть снабжены сигнальным устройством, интегратором или пневматическим преобразователем с унифицированным пневматическим выходным сигналом.

Рассмотренный дифманометр типа ДП-710Р рассчитан на предельное допускаемое рабочее избыточное давление 250 кгс/см^2 (25 МПа). Дифманометры-расходомеры, применяемые для измерения расхода

жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве, имеют класс точности 1, а дифманометры-перепадомеры и уровнемеры — 1 и 1,5.

Далее в качестве примера рассмотрим дифманометр поплавковый с масляным заполнением типа ДПЭМ, схематично показанный на рис. 12-4-3. Дифманометр не имеет отсчетных устройств. Он состоит из сменного *1* и поплавкового *2* сосудов, соединенных U-образно. На дне поплавкового сосуда укреплена разделительная трубка *6* из немагнитной нержавеющей стали. Снаружи на этой трубке установлен дифференциально-трансформаторный преобразователь *7*. К поплавку *3* снизу прикреплена биметаллическая пластина *4*, которая жестко связана с сердечником *5*. Биметаллическая пластина позволяет уменьшить температурную погрешность прибора. Дифференциально-трансформаторный преобразователь с помощью пружины *9* прижат к гайке *8*, позволяющей перемещать преобразователь вдоль разделительной трубки в тех случаях, когда необходимо изменить его положение относительно сердечника (первоначальная установка на нуль). Однако при эксплуатации дифманометра корректировка нуля производится корректором нуля во вторичном приборе.

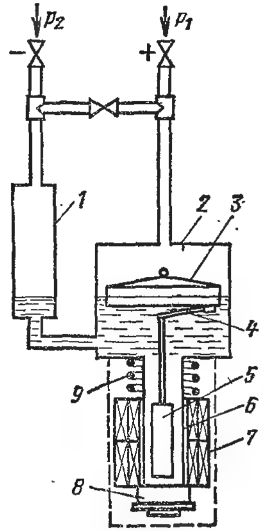


Рис. 12-4-3. Дифманометр поплавковый типа ДПЭМ.

Дифманометры ДПЭМ выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 40 до 400 кгс/м² (от 400 до 4000 Па). Эти дифманометры имеют класс точности 1. Если дифманометр отградуирован вместе с вторичным прибором, то комплекту присваивается класс точности 1,5. Дифманометры ДПЭМ рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 2,5 кгс/см². Они применяются для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве, разности давлений, разрежения (тяги) и небольшого избыточного давления (напора).

Дифманометры ДПЭМ могут работать в комплекте с одним вторичным прибором дифференциально-трансформаторной системы.

12-5. Дифманометры с упругими чувствительными элементами

Общие сведения. Рассмотренные выше дифманометры несмотря на их существенные достоинства (длительный срок службы и др.) и широкое применение в промышленности обладают рядом недостатков, обусловленных главным образом наличием в этих приборах рабочей жидкости. К числу основных недостатков указанных приборов следует отнести: большое запаздывание показаний, малые рабо-

чие частоты; возможность потери части рабочей жидкости, например, из-за односторонней перегрузки; непригодность таких приборов для нестационарных установок, например судовых. Следует также отметить, что для дифманометров с ртутным заполнением к указанным выше недостаткам добавляются еще вредность ртути и необходимость производства работ при их ревизии в специально оборудованных ртутных комнатах.

Эти недостатки, безусловно, способствовали как у нас, так и за границей к разработке приборов, не требующих разделительной жидкости и особенно ртути. Первыми такими приборами в 40-х годах были предложены дифманометры с упругими чувствительными элементами и, в частности, сильфонные, но широкого распространения они не получили. Дальнейшие работы в этой области позволили создать более совершенные дифманометры с упругими чувствительными элементами, которые получили большое распространение. Следует также отметить, что за последние годы разработан и освоен приборостроительной промышленностью ряд новых конструкций дифманометров с упругими чувствительными элементами.

В качестве упругих чувствительных элементов в выпускаемых в настоящее время и широко используемых в промышленности дифманометрах применяют мембранные блоки, вялые (неметаллические) мембраны с жестким центром, сильфоны и сильфонные блоки (гл. 10).

Ниже рассмотрим наиболее характерные типы дифманометров с упругими чувствительными элементами, широко применяемые в энергетике и других отраслях промышленности.

Дифманометры мембранные типа ДМ. Дифманометры типа ДМ, выпускаемые Московским приборостроительным заводом «Манометр» и Ивано-Франковским приборостроительным заводом, снабжены унифицированным линейным дифференциально-трансформаторным преобразователем, не имеют отсчетных устройств и применяются в комплекте с одним вторичным прибором дифференциально-трансформаторной системы КПД1, КВД1, КСД1, КСД2 или КСД3.

На рис. 12-5-1 показана в упрощенном виде схема устройства дифманометра типа ДМ. Чувствительным элементом прибора является мембранный блок (рис. 10-2-4, *в*), состоящий из двух мембранных коробок *1* и *3*, закрепленных с обеих сторон в основании *2*. Основание с верхней и нижней крышками корпуса прибора образует две камеры: нижнюю — «плюсовую» и верхнюю — «минусовую». Внутренние полости мембранных коробок, заполненные дистиллированной водой, сообщаются через отверстие в перегородке.

С центром мембраны верхней коробки с помощью немагнитного штока жестко связан сердечник *4* дифференциально-трансформаторного преобразователя *5*. Сердечник находится внутри разделительной трубки *6*, изготовленной из немагнитной нержавеющей стали.

В дифманометре предусмотрено устройство, которое позволяет перемещать преобразователь вдоль разделительной трубки для пер-

воначальной корректировки нулевого значения выходного параметра. Во время эксплуатации дифманометров корректировка нуля производится корректором нуля вторичного прибора.

Давления p_1 и p_2 к камерам дифманометра подводятся через два запорных вентиля, расположенных на вертикальных трубках. Для сообщения между собой плюсовой и минусовой камер служит уравнительный вентиль, расположенный ниже запорных вентилей. Под воздействием разности давлений $p_1 - p_2$ нижняя мембранная коробка сжимается, жидкость из нее перетекает в верхнюю коробку, вызывая перемещение центра мембраны верхней коробки, а вместе с тем и сердечника дифференциально-трансформаторного преобразователя. Это перемещение приводит к изменению взаимной индуктивности между первичной и вторичной обмотками преобразователя, а следовательно, и к изменению напряжения на выходе его пропорционально измеряемому перепаду давления.

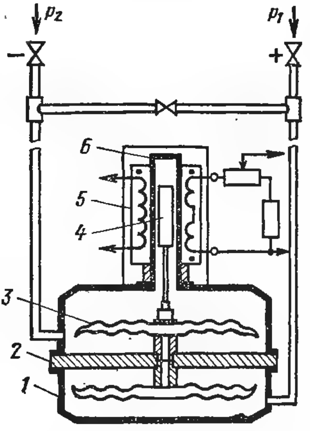


Рис. 12-5-1. Дифманометр мембранный типа ДМ.

Если фактический перепад давления превышает предельный номинальный перепад давления дифманометра или одна из мембранных коробок находится под воздействием односторонней перегрузки, повреждения (разрушения) коробки не произойдет, так как мембраны этой коробки сложатся по профилю, вытеснив всю жидкость во вторую коробку.

Изменение объема жидкости, заполняющей мембранный блок, под влиянием температуры окружающего воздуха не вызывает перемещения центра мембраны верхней коробки.

В зависимости от значения предельного номинального перепада давления в дифманометрах ДМ устанавливаются мембранные блоки необходимой жесткости.

Заводом «Манометр» выпускаются дифманометры типа ДМ трех моделей на предельно допускаемые рабочие избыточные давления 63 кгс/см² (6,3 МПа), 250 кгс/см² (25 МПа) и 630 кгс/см² (63 МПа). Первые две модели приборов выпускаются на предельные номинальные перепады давлеиия от 160 до 2500 кгс/м² (от 1600 до 25 000 Па) и от 0,4 до 6,3 кгс/см² (от 0,04 до 0,63 МПа) приведенного выше ряда (§ 12-1). Дифманометры, рассчитанные на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 630 кгс/см² (63 МПа), выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 0,4 до 6,3 кгс/см² (от 0,04 до 0,63 МПа) приведенного выше ряда. Дифманометры имеют классы точности 1 и 1,5.

Ивано-Франковский приборостроительный завод выпускает дифманометр ДМ (модель 3583), рассчитанный на предельно допускаемое рабочее давление 160 кгс/см² (16 МПа) и предельные номинальные перепады давления, аналогичные установленным для первых двух моделей приборов завода «Манометр».

Дифманометры ДМ широко применяются в качестве расходомеров в комплекте с сужающими устройствами, перепадомеров и

уровнемеров для измерения уровня воды в барабане парогенераторов, баках и т. п.

Дифманометры ДМ с предельными номинальными перепадами давлений 160 и 250 кгс/м² (1600 и 2500 Па) завод «Манометр» рекомендует применять только для измерения перепада давления газов.

При градуировке и поверке дифманометров ДМ «минусовая» камера сообщается с атмосферой; а перепад давления создается путем подачи воздуха под давлением, равным $\Delta p_н$, в плюсовую камеру.

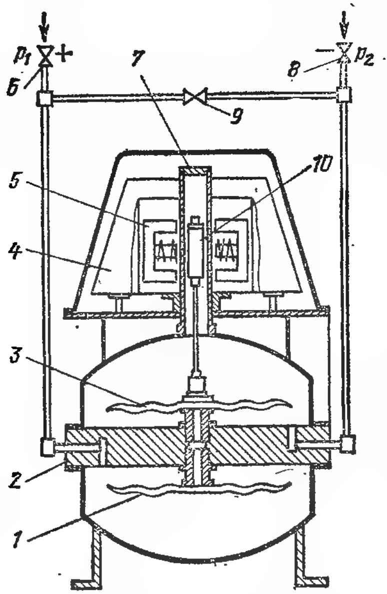


Рис. 12-5-2. Дифманометр мембранный электрический типа ДМЭ (или ДМЭР).

Если же дифманометр заполняется жидкостью, происходит смещение «нуля», вызываемое влиянием столба жидкости между мембранными коробками. При подаче рабочего давления может также произойти смещение «нуля», вызываемое деформацией мембранных коробок и крышек. Поэтому перед пуском дифманометра в работу необходимо проверить значение выходного параметра (показание по шкале вторичного прибора), соответствующее нулевому значению перепада давления, и в случае необходимости скорректировать его.

Дифманометры мембранные типа ДМЭ и ДМЭР. Дифманометры мембранные ДМЭ и ДМЭР, выпускаемые казанским заводом «Теплоконтроль» [58], разработаны НИИТеплоприбором совместно с ВТИ [56]. Эти дифманометры созданы для применения в энергетике, металлургии и других отраслях промышленности. Они имеют унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА и могут применяться в комплекте с миллиамперметрами КПУ1, КВУ1, КСУ1, КСУ2, КСУ4, выполненными на базе автоматических потенциометров (гл. 4), а также с регуляторами и другими устройствами в системах управления.

На рис. 12-5-2 схематично показано устройство дифманометра мембранного типа ДМЭ (или ДМЭР). Измерительный блок дифманометра с чувствительным элементом, состоящим из двух мембранных коробок *1* и *3*, выполнен аналогично измерительному блоку дифманометра ДМ (рис. 12-5-1). С центром верхней мембранной коробки *3* с помощью немагнитного штока жестко связан магнитный плунжер *10*. Он может перемещаться внутри разделительной трубки *7* из немагнитной нержавеющей стали. На разделительной трубке *7* установлен передающий преобразователь с магнитной компенса-

цией *5* (гл. 8). Преобразователь снабжен корректором нуля, который на рис. 12-5-2 не показан. Рядом с преобразователем расположен полупроводниковый усилитель *4*. В дифманометрах ДМЭ применяют усилитель УП-МК, а в дифманометрах-расходомерах ДМЭР — усилитель УП-МКР. У дифманометров ДМЭР выходной сигнал постоянного тока пропорционален расходу, а у дифманометров ДМЭ — перепаду давления.

Подвод давлений p_1 и p_2 в камеры дифманометра осуществляется через две трубки и каналы в перегородке *2*. На трубках установлены два запорных (*6* и *8*) и один уравнительный вентиль *9*.

Дифманометры ДМЭ и ДМЭР рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 400 кгс/см² (40 МПа). Они выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 400 до 2500 кгс/м² (от 4000 до 25 000 Па) и от 0,4 до 6,3 кгс/см² (от 0,04 до 0,63 МПа) приведенного выше ряда (§ 12-1). Дифманометры ДМЭ имеют класс точности 1, а приборы ДМЭР — класс точности 1,5. Выпускаются также дифманометры-перепадомеры ДМЭ класса точности 1,5 на предельные номинальные перепады давления 160 и 250 кгс/м² (1600 и 2500 Па), используемые только для измерения перепада давления газа.

Допускаемое сопротивление нагрузки дифманометров ДМЭ (ДМЭР) до 2,5 кОм; температура окружающего воздуха 0—60°С; допускаемая частота вибрации 30 Гц; амплитуда вибрации не более 0,2 мм. Питание от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность не более 5 В · А для ДМЭ и 8 В · А для ДМЭР. Исполнение пылебрызгозащищенное.

Дифманометры мембранного типа ДМИ. Дифманометры мембранные ДМИ, изготовляемые Харьковским заводом КИП, снабжены дифференциально-трансформаторным преобразователем, показанным на рис. 8-4-8 (гл. 8). Они работают в комплекте с вторичным показывающим или самопишущим прибором ферродинамической системы ВФП и ВФС (гл. 8) и могут быть использованы в качестве перепадомеров и расходомеров для измерения расхода жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве.

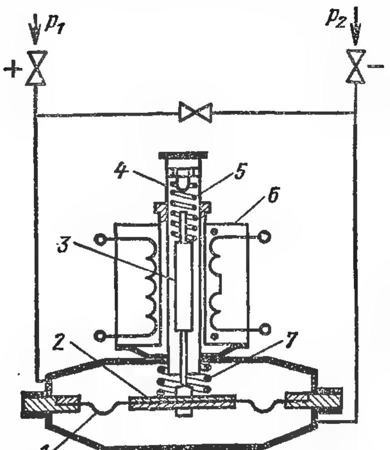


Рис. 12-5-3. Дифманометр мембранный типа ДМИ.

На рис. 12-5-3 приведена упрощенная схема устройства дифманометра ДМИ. Чувствительным элементом прибора является вялая (неметаллическая) мембрана *1* с жестким центром *2*, работающая совместно с винтовой цилиндрической пружиной *5*. Мембрана, укрепленная между двумя крышками корпуса прибора, образует две камеры, в которые подводятся давления p_1 и p_2. Снаружи разделительной трубки *4*, изготовленной из немагнитной нержавеющей стали, находится диф-

ференциально-трансформаторный преобразователь *6*. Для обеспечения устойчивости нуля прибора между жестким центром мембраны и корпусом установлена дополнительная пружина *7*, создающая предварительное натяжение основной измерительной пружины *5*.

Под действием разности давлений ($p_1 - p_2$) жесткий центр мембраны и связанный с ним полый сердечник *3* дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещаются до тех пор, пока сила, вызываемая разностью давлений, не уравновесится силой упругости винтовой пружины. Перемещение сердечника изменяет взаимную индуктивность между обмотками преобразователя, а вместе с тем и напряжение (э. д. с.) на выходе прибора. Выходной сигнал дифманометра пропорционален измеряемой разности давлений.

Дифманометры ДМИ имеют класс точности 1. Они рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 250 кгс/см^2 (25 МПа) [17]. Дифманометры ДМИ выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 63 до 2500 кгс/м^2 (от 630 до 25 000 Па) и от 0,4 до 1,0 кгс/см^2 (от 0,04 до 0,1 МПа).

Дифманометры сильфонные типа ДС. Дифманометры сильфонные, выпускаемые казанским заводом «Теплоконтроль», используются в качестве перепадомеров, расходомеров в комплекте с сужающим устройством и уровнемеров.

Принцип действия дифманометров основан на использовании деформации сильфонного блока, воспринимающего измеряемый перепад давления и преобразующего его в угловое перемещение указателя или пера с помощью рычажного передающего механизма. Указатель или перо поворачивается до тех пор, пока сила, вызываемая перепадом давления, не уравновесится силами упругих деформаций двух сильфонов и винтовых противодействующих пружин блока и торсионной выводной трубки.

Сильфонный блок дифманометра ДСС, показанного на рис. 12-5-4, состоит из основания (перегородки) *7*, на котором укреплены два рабочих сильфона *5* и *9*, жестко связанных между собой штоком *10*. На свободном конце штока расположен диск с винтовыми противодействующими пружинами *12*. Левые концы этих пружин присоединены к нижнему борту неподвижного конуса *13*, укрепленного с помощью шпилек *11* на перегородке *7*. Оба одинаковых размеров сильфона и полость основания заполнены водно-глицериновой смесью (67% дистиллированной воды и 33% технически чистого глицерина), замерзающей при температуре —17°С.

Для уменьшения температурной погрешности прибора, вызываемой изменением объема жидкости, заполняющей сильфонный блок, при изменении температуры окружающего воздуха, сильфон *5* снабжен температурным компенсатором *3* в виде трех дополнительных гофр. Внутренние полости температурного компенсатора и сильфона сообщаются между собой отверстиями в разделительном стакане *4*. При изменении температуры окружающей среды, а вместе с тем и объема жидкости она будет перетекать через отверстия в разделительном стакане *4*.

Давления p_1 и p_2 подводятся в камеры дифманометра через два запорных вентиля, расположенных на вертикальных трубках. Для сообщения между собой плюсовой и минусовой камер служит уравнительный вентиль, расположенный на горизонтальной трубке. Под воздействием разности давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ сильфон 5 сжимается, жидкость из него частично перетекает через отверстие *1* в сильфон *9*, вызывая перемещение дна его стакана. При этом перемещается шток, жестко связанный с сильфонами, и изменяет натяг противодействующих пружин. Шток с помощью рычага *8*, находящегося в постоянном контакте с ним, при своем перемещении

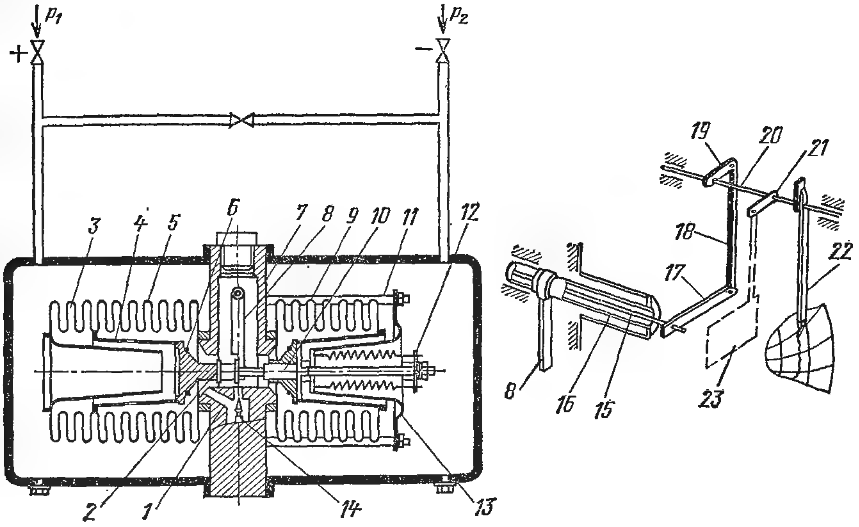


Рис. 12-5-4. Дифманометр сильфонный типа ДСС.

закручивает торсионную трубку *16*, которая поворачивает на некоторый угол ось *15*. Эта ось с помощью рычага *17*, шатуна *18* и поводка *19* поворачивает ось *20*, на которой насажено перо *22* для непрерывной записи показаний прибора на дисковой диаграммной бумаге. Привод диаграммы осуществляется от синхронного двигателя, а у некоторых модификаций дифманометров — от часового механизма.

Выше было сказано, что при деформации сильфона *5* жидкость из него частично перетекает через отверстие *1* в сильфон *9*, вызывая перемещение его дна. Размер отверстия можно изменять с помощью клапана *14*. Этот клапан, выполняющий функции демпфера прибора, позволяет изменять степень успокоения дифманометра. В случае необходимости для устранения влияния на работу прибора пульсаций в объекте, например в трубопроводе, где измеряется перепад давления, клапаном *14* можно пользоваться во время работы дифманометра.

Плавающее кольцо *2*, расположенное на штоке, перекрывает круглое отверстие в основании блока, и жидкость при закрытом клапане может перетекать через зазор между кольцом и стенками отверстия в очень небольшом количестве.

Каждый из рабочих сильфонов дифманометра снабжен специальным клапанным устройством, которое состоит из конуса на дне сильфона и уплотняющего резинового кольца *6*. Поэтому в тех случаях, когда фактический перепад давления превышает предельный номинальный перепад давления дифманометра или один из сильфонов находится под воздействием односторонней перегрузки, конический клапан сильфона садится на конусное седло основания *7* и перекрывает щель и отверстие для перетекания жидкости из сильфона, предохраняя его от повреждения (разрушения).

Дифманометры самопишущие типа ДСС и показывающие типа ДСП, предназначенные для измерения расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве, снабжают интегратором. В этом случае поводок *21*, закрепленный на оси *20* (рис. 12-5-4), соединяют с помощью шатуна с поводком интегратора *23*.

Некоторые модификации показывающих дифманометров типа ДСП снабжаются сигнальным устройством.

Дифманометры сильфонные типа ДСП могут быть снабжены пневматическим преобразователем с унифицированным пневматическим выходным сигналом 0,2—1 кгс/см^2 (0,02—0,1 МПа) или механоэлектрическим преобразователем с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА (гл. 8).

Дифманометры самопишущие типа ДСС выпускаются с дополнительным манометрическим механизмом, использующим трубчатую пружину Бурдона, для измерения и записи избыточного давления среды.

Сильфонные дифманометры типа ДСКС, предназначенные для измерения расхода неагрессивного газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве, изготовляют с коррекцией по давлению и температуре измеряемой среды. Сильфонный блок у этих приборов аналогичен показанному на рис. 12-5-4. Коррекция по давлению измеряемой среды осуществляется манометром с трубчатой пружиной Бурдона, свободный конец которой воздействует на корректирующий механизм.

Коррекция по температуре измеряемой среды осуществляется манометрическим термометром, состоящим из спиральной трубчатой пружины, термобаллона и соединительного капилляра длиной 10 м. При отклонении температуры измеряемой среды от расчетного значения свободный конец спиральной пружины воздействует на корректирующий механизм. Кроме того, дифманометры ДСКС снабжаются интегратором.

К числу новых разработок сильфонных дифманометров типа ДСС относятся самопишущие приборы с ленточной диаграммой. В дифманометрах этого типа угол поворота торсионного вывода сильфонного блока (рис. 12-5-4) преобразовывается передаточным механиз-

мом в прямолинейное движение пера. Запись на ленточной диаграмме может быть осуществлена с помощью пера, заполненного чернилами, или электротермическим способом на специальной диаграммной бумаге.

Рассмотренные дифманометры типа ДС, имеющие индекс «Н», рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 160 кгс/см² (16 МПа) и предельные номинальные перепады давления от 630 до 2500 кгс/м² (от 6300 до 25 000 Па) и на 0,4 и 0,63 кгс/см² (0,04 и 0,063 МПа). Дифманометры с индексом «В» выпускаются на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 320 кгс/см² (32 МПа) и предельные номинальные перепады давления от 0,63 до 1,6 кгс/см² (от 0,063 до 0,16 МПа). Дифманометры с указанными предельными номинальными перепадами давления применяются в качестве расходомеров.

Для дифманометров-перепадомеров ДС предельные номинальные перепады давления или сумма предельных номинальных перепадов давления установлены такие же, как и для дифманометров-расходомеров.

Для дифманометров-уравнемеров ДС предельные номинальные перепады давления или сумма предельных номинальных перепадов давления от 63 до 1600 см (от 0,63 до 16 м).

Классы точности рассмотренных дифманометров типа ДС 1 и 1,5. Дифманометры с коррекцией по давлению и температуре измеряемой среды при максимальных отклонениях давления и температуры от расчетных значений имеют класс точности 4.

Дифманометры сильфонные электрические типа ДСЭ. Дифманометры сильфонные ДСЭ, выпускаемые казанским заводом «Теплоконтроль» [58], разработаны НИИтеплоприбором совместно с ВТИ [56]. Они имеют унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА и могут применяться в комплекте с миллиамперметрами КПУ1, КВУ1, КСУ1, КСУ2 и КСУ4, а также с регуляторами и другими устройствами в системах управления. Дифманометры ДСЭ выпускаются в виде расходомеров (ДСЭР) для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве, напоромеров (ДСЭН), тягомеров (ДСЭТ) и тягонапоромеров (ДСЭТН).

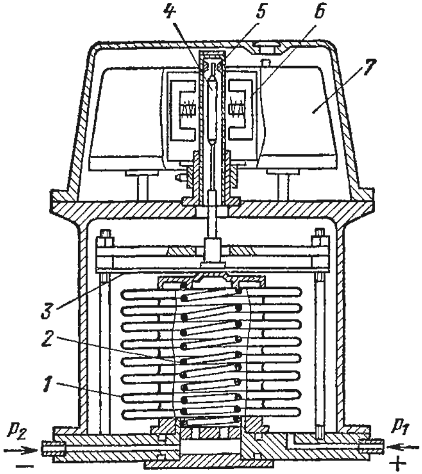


Рис. 12-5-5. Дифманометр сильфонный электрический типа ДСЭ.

На рис. 12-5-5 схематично показано устройство дифманометра сильфонного типа ДСЭ. Измерительный блок состоит из сильфона *1*, в который встроена винтовая цилиндрическая пружина *2*. Жесткость устанавливаемых в сильфон пружин различна и зависит от предельного номинального перепада давления. Сильфон жестко соединен с плоской пружинной подвеской *3*, с которой при помощи немагнитного штока связан магнитный плунжер *4*. Плунжер нахо-

дится в разделительной трубке *5* из немагнитной нержавеющей стали. Преобразователь с магнитной компенсацией *6* (гл. 8) закреплен на втулке, надетой на разделительную трубку. Рядом с преобразователем установлен полупроводниковый усилитель *7* (типа УП-МКР или УП-МК). Предусмотрена возможность перемещения преобразователя относительно плунжера для обеспечения предварительной регулировки нулевого выходного сигнала. Корректировка нулевого сигнала постоянного тока при эксплуатации дифманометра производится корректором нуля, который на рис. 12-5-5 не показан.

Дифманометры ДСЭ рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 0,25 кгс/см² (0,025 МПа). Дифманометры-расходомеры ДСЭР выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 100 до 400 кгс/м² (от 1000 до 4000 Па) и имеют класс точности 1,5. Дифманометры-тягомеры ДСЭТ и напоромеры ДСЭН, имеющие класс точности 1, выпускаются с верхними пределами измерения соответственно вакуумметрического и избыточного давления от 100 до 400 кгс/м² (от 1000 до 4000 Па). Дифманометр-тягонапоромер ДСЭТН-20 выпускается класса точности 1,5 и имеет верхний предел измерения вакуумметрического и избыточного давления 20 кгс/м² (200 Па).

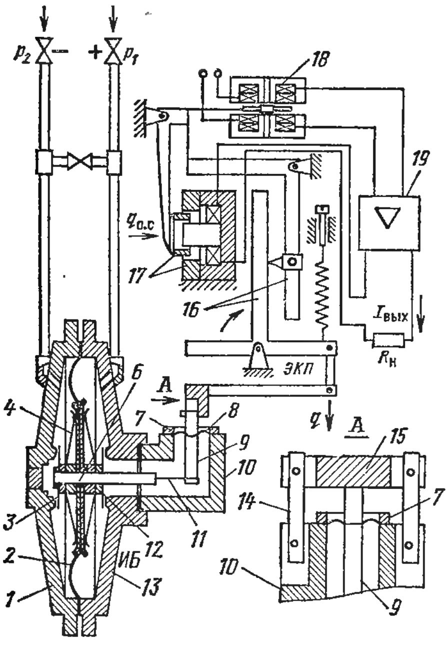


Рис. 12-5-6. Дифманометр-расходомер мембранный электрический типа ДМ-ЭР.

Условия эксплуатации дифманометров ДСЭ и рассмотренных выше дифманометров мембранных ДМЭ аналогичны.

Дифманометры мембранные электрические компенсационные типа ДМ-Э и ДМ-ЭР. Дифманометры мембранные ДМ-Э и ДМ-ЭР, выпускаемые рязанским заводом «Теплоприбор», имеют унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0—5 или 0—20 мА. Они применяются в комплекте с показывающими или самопишущими миллиамперметрами, а также с регуляторами и другими устройствами в системах управления. Дифманометры ДМ-ЭР предназначены для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве, а дифманометры ДМ-Э — для измерения перепада давления. Дифманометры ДМ-Э могут быть использованы также для измерения избыточного давления (напора) или вакуумметрического давления (тяги).

Рассматриваемые дифманометры с унифицированным выходным сигналом постоянного тока основаны на принципе электрической силовой компенсации усилия, развиваемого чувствительным элементом измерительного блока прибора.

На рис. 12-5-6 показан схематично дифманометр-расходомер мембранный типа ДМ-ЭР. Он состоит из измерительного блока *ИБ* и электросилового квадратичного преобразователя *ЭКП* (гл. 8).

Измеряемый перепад давления $(p_1 - p_2)$ воспринимается чувствительным элементом *2*, связанным с помощью рычагов с преобразователем, и преобразуется им в пропорциональное усилие q, которое с помощью рычажной системы *16* преобразователя автоматически уравновешивается усилием $q_{о.с}$, развиваемым силовым устройством обратной связи *17* при протекании в нем постоянного тока. При изменении измеряемого перепада давления происходит изменение сигнала, вырабатываемого индикатором рассогласования *18* преобразователя. Этот сигнал рассогласования усиливается и преобразуется усилителем *19* в выходной сигнал постоянного тока, который поступает в линию дистанционной передачи к вторичному прибору или другому устройству и одновременно в обмотку силового устройства обратной связи.

Значение выходного сигнала постоянного тока пропорционально у дифманометров-расходомеров ДМ-ЭР измеряемому расходу, у дифманометров ДМ-Э с электросиловым линейным преобразователем — измеряемому перепаду давления.

В качестве чувствительного элемента в измерительном блоке дифманометра ДМ-ЭР (или ДМ-Э) применена неметаллическая мембрана *2* с жестким центром. Эта мембрана разделяет измерительную камеру, образованную фланцами *1* и *13*, на две полости. В правую полость через запорный вентиль и трубку подводится давление p_1, а в левую — давление p_2 $(p_2 < p_1)$. Два конусных диска *4*, стягиваемые в центре гайками *12* и штоком *6*, придают чувствительному элементу необходимую прочность при воздействии одностороннего перегрузочного давления. Сила, создаваемая жестким центром чувствительного элемента, воспринимается двумя плоскими пружинами *3*, обеспечивающими свободу перемещения мембраны в направлении тягового усилия. Связь жесткого центра чувствительного элемента с выводом рычага *9* осуществляется с помощью ленточной тяги *11*, изготовленной из упругого материала. Вывод рычага *9* из плюсовой полости с рабочим давлением уплотнен с помощью мембраны *8*, прижатой по внутреннему диаметру рычагом траверсы *15* к кромке рычага *9*. Наружный контур мембраны прижат к основанию *10* колодкой *7*. Две упругие ленты *14* удерживают рычаг *9* от осевого перемещения при воздействии на мембрану рабочего давления. Конструкция вывода обеспечивает возможность поворота рычага *9* относительно условной оси, образованной пересечением плоскостей, в которых расположены мембрана и упругие ленты.

Дифманометры ДМ-Э1 и ДМ-ЭР1, рассчитанные на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 2,5 кгс/см^2 (0,25 МПа), выпускаются иа предельные

номинальные перепады давления от 16 до 100 кгс/м² (от 160 до 1000 Па) приведенного выше ряда (§ 12-1). Дифманометры ДМ-Э2 и ДМ-ЭР2, рассчитанные на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 10 кгс/см² (1 МПа), выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 100 до 630 кгс/м² (от 1000 до 6300 Па). Эти дифманометры имеют класс точности 1, кроме приборов ДМ-Э1, ДМ-ЭР1 и ДМ-Э2, ДМ-ЭР2, с предельными номинальными перепадами давления 160 и 1000 Па (соответственно), которые выпускаются класса точности 1,5.

В выпускаемых рязанским заводом «Теплоприбор» дифманометрах ДМ-П1 и ДМ-П2 с унифицированным пневматическим выходным сигналом 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа) используется измерительный блок приборов ДМ-Э. Для преобразования усилия, развиваемого чувствительным элементом измерительного блока под действием измеряемого перепада давления, в пропорциональный ему выходной пневматический сигнал применяют пневмосиловой линейный преобразователь, показанный на рис. 8-10-1 (гл. 8). Основные технические данные приборов ДМ-П1 и ДМ-П2 аналогичны приведенным выше для дифманометров ДМ-Э1 и ДМ-Э2.

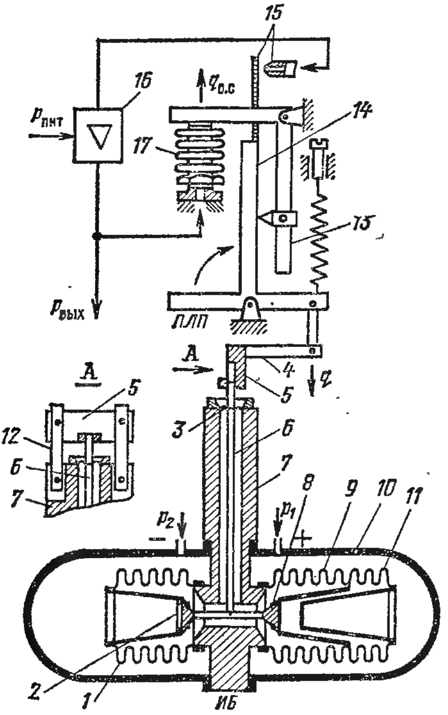


Рис. 12-5-7. Дифманометр сильфонный пневматический типа ДС-П.

Дифманометры сильфонные пневматические типа ДС-П. Дифманометры сильфонные ДС-П с пневматическим выходным сигналом 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа) выпускаются рязанским заводом «Теплоприбор». Они предназначены для измерения перепада давления, расхода жидкостей, газов и пара в комплекте с сужающим устройством, а также уровня жидкости. Для измерения этих величин дифманометры применяются в комплекте с вторичным прибором или устройством, рассчитанным на входной пневматический сигнал 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа). Дифманометры могут быть использованы, кроме того, для работы с регуляторами.

На рис. 12-5-7 показан схематично дифманометр сильфонный пневматический типа ДС-П, который состоит из измерительного блока *ИБ* и пневмосилового линейного преобразователя *ПЛП* (гл. 8).

Действие этих дифманометров основано на принципе компенсации усилия, развиваемого чувствительными элементами измерительного блока прибора. Измеряемый перепад давления ($p_1 - p_2$) воспринимается чувствительными элементами *1* и *9*, связанными с помощью рычагов *6* и *4* с преобразователем, и преобразуется в пропорциональное усилие q, которое с помощью рычажной системы *13* и *14* пневмосилового преобразователя автоматически уравновешивается усилием $q_{о. с}$ сильфона обратной связи *17*. При изменении измеряемого перепада давления и усилия q происходит незначительное (микронное) перемещение рычажной системы и связанной с ней заслонки индикатора рассогласования *15* типа сопло-заслонка. Индикатор рассогласования преобразует это перемещение в управляющий сигнал давления сжатого воздуха, поступающий на вход пневматического усилителя *16*. Выходной сигнал усилителя $p_{вых}$ поступает в линию дистанционной передачи к вторичному прибору или другому устройству и одновременно в сильфон обратной связи. Значение выходного сигнала $p_{вых}$ пропорционально измеряемому перепаду давления.

Измерительный блок состоит из плюсовой и минусовой камер, разделенных основанием *7*. В камерах расположены чувствительные элементы — сильфоны *1* и *9*. Сильфоны с одной стороны жестко связаны с основанием, с другой стороны — с клапанами *2* и *8*, снабженными уплотняющими резиновыми кольцами. Клапаны между собой соединены штоком, с которым связан рычаг *6*. Внутренняя полость узла сильфонов заполнена кремнийорганической жидкостью. Изменение объема жидкости, заполняющей узел сильфонов, вызванное колебаниями температуры окружающего воздуха и действием рабочего давления, воспринимается компенсационным сильфоном *11*.

Вывод рычага *6* из корпуса *10* уплотнен с помощью мембраны *3*. Две упругие ленты *12* удерживают рычаг *6* от осевого перемещения при воздействии на мембрану рабочего давления. Такая конструкция вывода обеспечивает возможность поворота рычага *6* с траверсой *5* относительно условной оси, образованной пересечением плоскостей, в которых расположены мембрана и упругие ленты.

Дифманометры ДС-П допускают в эксплуатации перегрузки, в десять раз превышающие предельный номинальный перепад давления, но не более 10 кгс/см² (1 МПа).

Дифманометры сильфонные пневматические ДС-П выпускаются трех типов ДС-П3, ДС-П4 и ДС-П5, отличающихся друг от друга только диаметрами сильфонов; они рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 400 кгс/см² (40 МПа) и соответственно на предельные номинальные перепады давления от 400 до 2500 кгс/м² (от 4000 до 25 000 Па), от 0,4 до 1,6 кгс/см² (от 0,04 до 0,16 МПа) и от 2,5 до 6,3 кгс/см² (от 0,25 до 0,63 МПа).

Дифманометры ДС-П3 с предельным номинальным перепадом давления 400 кгс/м² (4000 Па) выпускаются классов точности 1 и 1,5. Дифманометры ДС-П4, ДС-П5 и ДС-П3 с другими указанными выше предельными номинальными перепадами давления выпускаются классов точности 0,6 и 1.

Кроме рассмотренных дифманометров сильфонных пневматических выпускаются и другие типы для измерения перепада давления, уровня или расхода специальных сред (водорода, аммиака, кислорода, окислов азота, серной и азотной кислот и др.).

Дифманометры сильфонные компенсационные выпускаются также и с выходным сигналом постоянного тока 0—5 или 0—20 мА (ДС-Э и ДС-ЭР). В этих приборах используется измерительный блок такой же, как и дифманометрах ДС-П. В дифманометрах ДС-Э, предназначенных для измерения перепада давления или уровня жидкости, применяют электросиловой линейный преобразователь (см. рис. 8-8-1), а в дифманометрах ДС-ЭР, предназначенных для измерения расхода по перепаду давления в сужающем устройстве, — электросиловой квадратичный преобразователь (гл. 8).

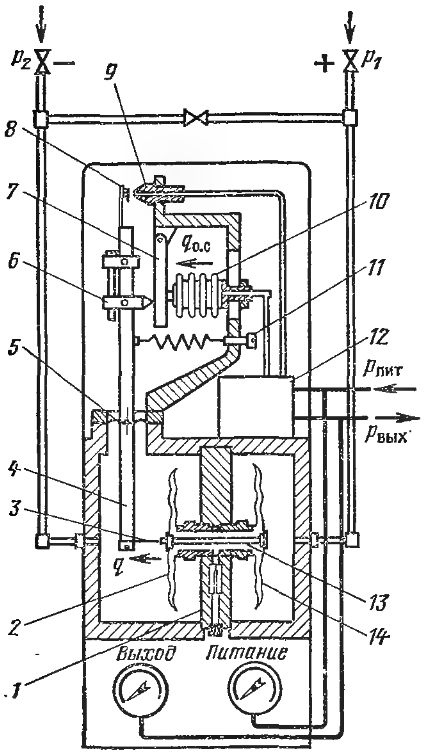


Рис. 12-5-8. Дифманометр мембранный пневматический ДМПК-100.

Дифманометры мембранные пневматические компенсационные ДМПК. Дифманометр мембранный ДМПК-100 (рис. 12-5-8), выпускаемый рязанским заводом «Теплоприбор», имеет унифицированный пневматический выходной сигнал. Он предназначен для измерения перепада давления, расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве, а также уровня жидкости. Дифманометр ДМПК-100 используется также в системах автоматического регулирования.

Для измерения указанных выше величин дифманометр ДМПК-100 может применяться в комплекте с любым вторичным прибором или устройством, рассчитанным на измерение избыточного давления от 0,2 до 1 кгс/см² (от 0,02 до 0,1 МПа).

Принцип действия дифманометра основан на компенсации усилия, развиваемого упругим чувствительным элементом измерительного блока.

Чувствительным элементом прибора является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок *2* и *14*, закрепленных с обеих сторон в основании *1*. Это основание с двумя боковыми крышками корпуса прибора образует измерительные камеры. В правую

камеру через запорные вентиль и трубку подводится давление p_1, а в левую камеру — давление p_2 ($p_2 < p_1$). Внутренние полости мембранных коробок соединены между собой каналом и заполнены жидкостью (40%-ный раствор глицерина в дистиллированной воде).

Внешние жесткие центры мембран обеих коробок соединены между собой штоком *13*. Центр мембранной коробки минусовой камеры скреплен с основным рычагом *4* пневмосилового линейного преобразователя пластинчатой тягой *3*. Вывод основного рычага из минусовой камеры с высоким рабочим давлением уплотнен с помощью мембраны *5* из нержавеющей стали, приваренной к рычагу *4* и втулке, закрепленной в корпусе прибора.

В этом приборе, так же как и в дифманометре, показанном на рис. 12-5-6, две упругие ленты (на рис. 12-5-8 не показаны) удерживают рычаг *4* от осевого перемещения при воздействии на мембрану *5* рабочего давления. Такая конструкция вывода обеспечивает возможность поворота основного рычага относительно условной оси, образованной пересечением плоскостей, в которых расположены мембраны и ленты (на рис. 12-5-8 ось рычага *4* обозначена точкой).

Измеряемая разность давлений воздействует на упругий чувствительный элемент и преобразуется в пропорциональное усилие q, которое через рычажную систему *4* и *7* пневмосилового преобразователя уравновешивается усилием $q_{о.\,с}$ сильфона обратной связи *10*. При изменении измеряемой разности давлений и усилия q происходит незначительный поворот рычажной системы пневмосилового преобразователя и связанной с рычагом *4* заслонки *8* индикатора рассогласования. При этом меняется зазор между заслонкой и соплом *9* (максимальный зазор между соплом и заслонкой составляет 0,02—0,05 мм), вызывая изменение давления сжатого воздуха в линии сопла. Давление сжатого воздуха в линии сопла управляет пневматическим усилителем *12* (пневмореле) таким образом, что выходное давление воздуха, поступающее в линию дистанционной передачи и сильфон обратной связи, изменяется пропорционально измеряемому перепаду давления. Мерой измеряемого усилия q, а вместе с тем и перепада давления является текущее значение выходного давления $p_{вых}$, необходимое для создания уравновешивающего усилия обратной связи $q_{о.\,с}$.

Настройка прибора на заданный предельный номинальный перепад давления производится путем изменения передаточного отношения в кинематике пневмосилового преобразователя за счет положения подвижной ножевой опоры *6* и положения сильфона обратной связи. В дифманометрах ДМПК-100 используются два типа сильфонов обратной связи с разными характеристиками. Точная установка начального значения выходного сигнала прибора 0,2 кгс/см² (0,02 МПа) производится при помощи пружины корректора нуля *11*.

Питание прибора осуществляется очищенным от пыли, влаги и масла воздухом, номинальное избыточное давление которого $p_{пит} = 1{,}4$ кгс/см².

Для контроля входного и выходного давлений на лицевой панели дифманометра установлены два миниатюрных манометра.

Дифманометры типа ДМПК-100, рассчитанные на предельно допускаемое избыточное рабочее давление 100 кгс/см² (10 МПа), выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 630 до 2500 кгс/м² (от 6300 до 25 000 Па) и от 0,4 до 1 кгс/см² (от 0,04 до 0,1 МПа).

В дифманометрах мембранных пневматических компенсационных типа ДМПК-4, рассчитанных на предельно допускаемое избыточное рабочее давление 4 кгс/см² (0,4 МПа), в качестве чувствительного элемента измерительного блока используется вялая (неметаллическая) мембрана с жестким центром (см. рис. 10-2-6, *б*). По принципу действия приборы ДМПК-4 и ДМПК-100 аналогичны.

Дифманометры ДМПК-4, выпускаемые на предельные номинальные перепады давления от 25 до 400 кгс/м² (от 250 до 400 Па), используются для измерения в комплекте с вторичными приборами перепада давления, избыточного давления (напора), вакуумметрического давления (тяги) и расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве. Они могут работать также и с автоматическими регуляторами.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

13-1. Общие методические указания

Рассмотренные выше методы и средства измерений избыточного, абсолютного и вакуумметрического давлений и разности давлений широко применяются при автоматизации технологических процессов, а также при проведении научных исследований. Точность измерений давления и разности давлений зависит от выбранного метода измерения, от метрологических характеристик средств измерений, от условий измерения и ряда других причин. Поэтому выбор метода и средств измерений давления и разности давлений необходимо производить в зависимости от поставленной задачи, требуемой точности и условий измерения. При выборе средств измерений необходимо иметь в виду не ту точность, которая свойственна им при работе в нормальных условиях, а ту точность, которую приборы могут обеспечить в данных эксплуатационных условиях.

Одновременно с выбором средств измерений в зависимости от их метрологических характеристик должен стоять вопрос о минимальном и максимальном значениях измеряемого давления или разности давлений и, следовательно, о выборе шкалы прибора. При выборе первичного прибора не следует брать приборы, требующие применения дополнительного преобразователя для согласования рода энергии выходного сигнала первичного и входного сигнала вторичных измерительных устройств. Применение дополнительного преобразователя в измерительной системе увеличивает погрешность

измерения. При создании автоматизированных систем управления целесообразно применять первичные приборы для измерения давления и разности давлений с унифицированным выходным сигналом постоянного тока.

При выборе шкалы средств измерений давления и разности давлений необходимо иметь в виду, что допускаемые погрешности приборов давления, дифманометров и вторичных приборов выражены в виде приведенных погрешностей в процентах от диапазона измерения. Поэтому при прочих равных условиях погрешность измерения давления или разности давлений для первой половины шкалы прибора будет больше, чем для второй половины шкалы его.

Внешние условия, при которых должны работать средства измерений давления и разности давлений, могут сильно влиять на точность измерения, поэтому при выборе места их установки необходимо учитывать это.

Место установки этих приборов должно обеспечивать удобство обслуживания и наблюдения за их работой. Длина соединительных линий от места отбора давления, разрежения или разности давлений до прибора должна быть минимальной. Наибольшая длина соединительной линии не должна превышать 50 м. При этом следует иметь в виду, что с увеличением длины соединительной линии рабочая полоса пропускания частот для данного прибора уменьшается [5].

Для предохранения приборов от непосредственного действия горячей среды, давление которой измеряется, необходимо устанавливать специальные дополнительные устройства, рассматриваемые ниже.

При выборе места отбора давления необходимо, чтобы в пространстве, где предполагается измерить давление среды, отсутствовали возмущения течения последней. Сравнительно просто производится измерение давления через специальное отверстие в стенке поверхности, ограничивающей среду, ибо в этом случае нет необходимости вводить в нее постороннее тело и, следовательно, опасность возмущения течения среды отпадает. Таким образом, при измерении давления или разности давлений необходимо, чтобы устройства для отбора давлений не вызывали возмущения течения потока. Особенно необходимо следить за тем, чтобы края отверстия в стенке, например, трубопровода или короба со стороны протекающей среды не выступали в нее, так как малейшие выступы или заусенцы могут привести к неправильным измерениям давления или разности давлений.

13-2. Измерение близкого к атмосферному давления газовых сред

В теплоэнергетических установках для поддержания нормального режима их работы необходимо измерять разрежение или избыточное давление в газовоздухопроводах, пылепроводах, газоходах

и топках. Для этих целей используются тягомеры, напоромеры или тягонапоромеры, рассмотренные выше. В целях обеспечения правильности отбора и измерения давления необходимо применять отборные устройства, конструкции которых приведены в отраслевых нормалях.

Для уменьшения числа приборов прямого действия (например, тягомеров или напоромеров) на практике часто применяют краны-переключатели типа КП-3 (на три точки) и КП-6 (на шесть точек). Краны-переключатели позволяют поочередно соединять один прибор прямого действия с тремя или шестью соединительными линия-

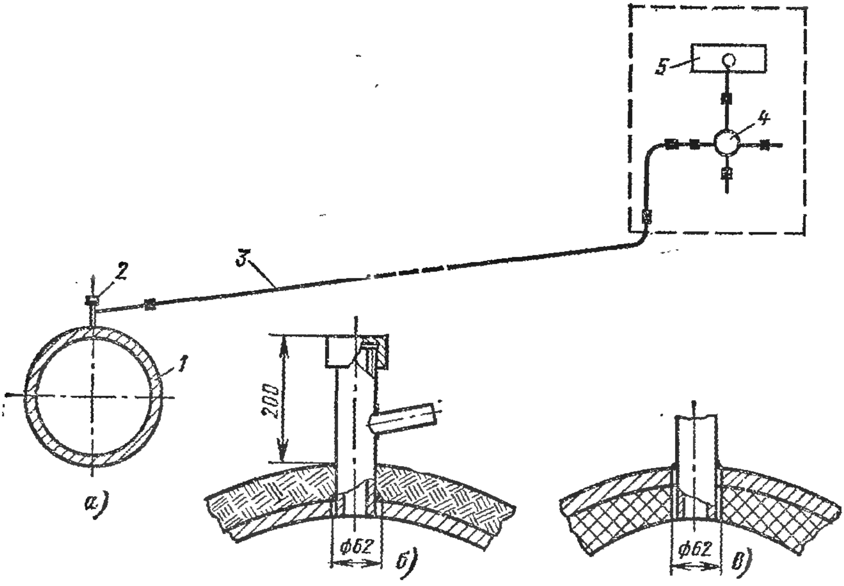


Рис. 13-2-1. Схема трубных соединений при измерении давления.

а — схема соединений при измерении давления показывающим напоромером (или тягомером); *б* и *в* — узлы установки отборных устройств на газовоздухопроводах с наружной и внутренней изоляцией.

ми, подводящими разрежение или избыточное давление от мест измерения этих параметров.

На рис. 13-2-1, *а* показан вариант схемы трубных соединений показывающего прибора (тягомера или напоромера), установленного на местном щите, для измерения давления в газовоздухопроводе. На схеме соединений приняты следующие обозначения: *1* — газовоздухопровод; *2* — отборное устройство; *3* — соединительная линия; *4* — кран-переключатель типа КП-3; *5* — мембранный тягомер или напоромер. Соединительная линия на всем своем протяжении должна иметь односторонний уклон в сторону отбор-

ного устройства. Если же односторонний уклон соединительных линий невозможен, то в низших точках отдельных участков линий необходимо устанавливать отстойные сосуды для стока конденсата.

На горизонтальных и наклонных газовоздухопроводах отборное устройство должно устанавливаться в верхней части газовоздухопровода.

На тепловых электростанциях часто приходится измерять давление газовоздушных потоков, несущих большое количество взвешенных твердых частиц. При измерении давления такой среды (например, в пылепроводе) возможно отложение твердых частиц (пыли)

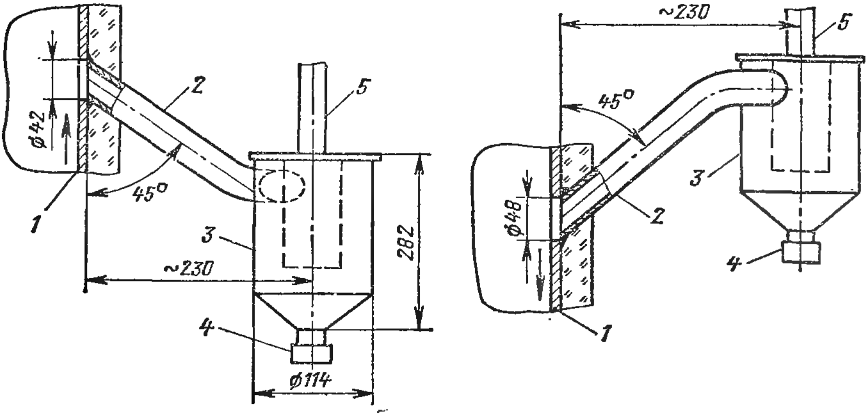


Рис. 13-2-2. Схема установки отборных устройств с циклонами при различных направлениях потока.

1 — стенка пылепровода с наружной изоляцией; *2* — труба отборная; *3* — циклон; *4* — заглушка, открываемая при очистке циклона; *5* — труба, соединяемая с линией прибора.

в соединительной линии, а также попадание пыли непосредственно в прибор. Поэтому при измерении давления в пылепроводах отборное устройство снабжают циклоном, не позволяющим пыли попадать в соединительную линию и прибор.

На рис. 13-2-2 представлена схема установки отборных устройств с циклонами на пылепроводах. Направление потоков в этих пылепроводах показано стрелками.

Для измерения разрежения в газоходах (например, парогенераторов, печей) применяют мембранные тягомеры прямого действия и тягомеры, снабженные передающими преобразователями. Для измерения давления в топках парогенераторов в зависимости от их мощности применяют мембранные тягонапоромеры прямого действия или тягонапоромеры, снабженные передающими преобразователями для передачи сигнала измерительной информации на щит управления.

При измерении давления в топках необходимо учитывать наличие пульсаций этого параметра. При применении для измерения разрежения (давления) в топке мембранного тягонапоромера упругий

чувствительный элемент (мембранный блок) его, а следовательно, и подвижная система с указателем будут работать в колебательном режиме. Это объясняется сравнительно малым изменением объема внутренней полости мембранного блока в процессе измерения. Поэтому для обеспечения нормального режима работы мембранного тягонапоромера необходимо в соединительную линию перед прибором устанавливать дроссель для сглаживания пульсаций разрежения (давления).

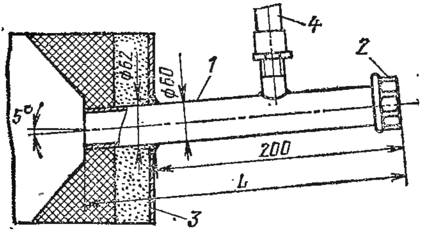


Рис. 13-2-3. Отборное устройство для газохода или топки.

Если для измерения давления в топке в качестве тягонапоромера используется колокольный дифманометр типа ДКО или поплавковый дифманометр типа ДПЭМ, то нет необходимости в соединительную линию перед прибором ставить дроссель. Это объясняется тем, что у приборов типа ДКО и ДПЭМ в процессе измерения по сравнению с мембранным тягонапоромером значительно изменяются объемы измерительных камер, что и способствует сглаживанию пульсаций. Кроме того, у этих приборов сердечник передающего преобразователя находится в трубке, заполненной трансформаторным маслом, и является демпфером.

На рис. 13-2-3 показано отборное устройство для измерения давления в газоходе или топке.

В этом отборном устройстве закладная труба *1*, снабженная колпаком *2*, установлена в кирпичной стенке и приварена к металлической обшивке *3*. К патрубку закладной трубы с помощью муфты и контргайки присоединена труба *4* соединительной линии. Для крепления закладной трубы в кирпичной стенке без металлической обшивки она снабжается тремя ребрами. Размер *L* закладной трубы берется в зависимости от толщины кирпичной стенки. Прокладка соединительной линии от места отбора до прибора должна выполняться по правилам, рассмотренным выше.

13-3. Измерение давления газов, жидкостей и пара

Для измерения давления на ответственных участках технологического объекта (например, давления перегретого водяного пара за парогенератором, давления питательной воды) применяют манометры, снабженные передающими преобразователями. Для контроля за изменением давления среды на вспомогательных участках технологического объекта применяют манометры прямого действия, которые устанавливают по месту или на местном щите.

Для выбираемого манометра рабочий предел измерения избыточного давления должен быть не менее 3/4 наибольшего значения

диапазона измерений при постоянном давлении и не менее 2/3 наибольшего значения диапазона измерений при переменном давлении.

При измерении давления жидкости (например, воды) в трубопроводе ($p_у \leqslant 25$ кгс/см², $t < 70$°С) манометр присоединяют через трехходовой кран (рис. 13-3-1, *а*). Трехходовой кран позволяет включить и отключить манометр, поверить нулевую точку и продуть соединительную линию, а также поверить прибор в рабочей точке. Для поверки манометра в рабочей точке, т. е. непосредственно в условиях эксплуатации, к фланцу трехходового крана присоединяют контрольный манометр.

На рис. 13-3-1, *б* показан узел отбора давления в вертикальном трубопроводе, а на рис. 13-3-1, *в* представлен вариант отбора давления в горизонтальном трубопроводе.

Для предохранения манометра от непосредственного действия горячей среды, например пара или горячей жидкости, при $p_у \leqslant 100$ кгс/см², $t \geqslant 70$°С манометр *1* присоединяют к трубопроводу *2* через кольцеобразную трубку *3* и трехходовой вентиль *4* (рис. 13-3-2). При измерении давления водяного пара (или горячей воды) перед включением манометра в работу с помощью трехходового вентиля производят продувку соединительной линии, что обеспечивает хорошее заполнение кольцеобразной трубки паром (или водой), а следовательно, и конденсатом. После того как конденсат (горячая вода) в кольцеобразной трубке остынет и будет иметь температуру, близкую к температуре окружающего воздуха, манометр включают в работу.

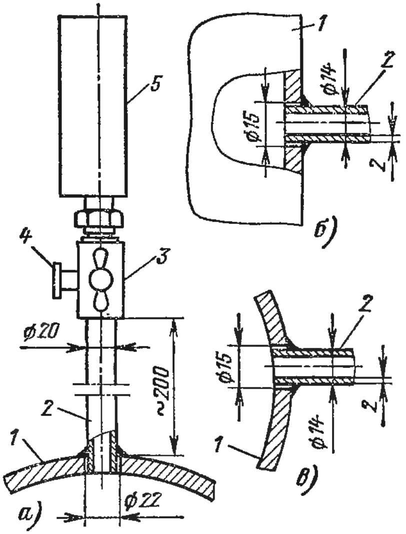


Рис. 13-3-1. Измерение давления в трубопроводе.

а — измерение давления воды в горизонтальном трубопроводе; *б* — отбор давления в вертикальном трубопроводе; *в* — отбор давления в горизонтальном трубопроводе.

1 — трубопровод; *2* — штуцер; *3* — трехходовый кран; *4* — фланец; *5* — манометр.

При установке манометра *1* на трубопроводе ($p_у = 100 \div 400$ кгс/см², $t > 70$°С) для измерения давления (рис. 13-3-3), например, воды к парогенератору или пара от парогенератора кроме трехходового вентиля *2* необходимо перед кольцеобразной трубкой *3* дополнительно ставить запорный вентиль *4*. Если манометр для измерения давления устанавливается на достаточном удалении от трубопровода, например на стене, то кольцеобразную трубку не ставят. В этом случае соединительная линия выполняется по схеме, показанной на рис. 13-3-4.

На месте измерения манометры лучше всего устанавливать таким образом, чтобы на них не действовало добавочное давление столба жидкости. В противном случае необходимо вводить поправку в пока-

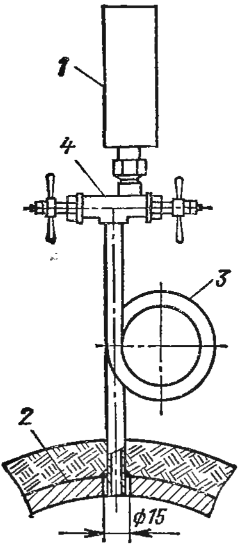


Рис. 13-3-2. Установка манометра на горизонтальном трубопроводе при $p_у \leqslant 100$ кгс/см², $t > 70$°C.

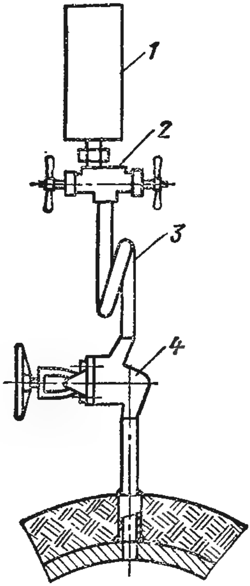


Рис. 13-3-3. Установка манометра на горизонтальном трубопроводе при $p_у = 100 \div 400$ кгс/см², $t > 70$°C.

зания манометров или градуировать их с включением этого добавочного давления, о чем делается соответствующая надпись на шкале прибора. Если манометр будет расположен выше места отбора давления, то также необходимо учитывать влияние столба жидкости, так как показания прибора в этом случае будут приуменьшены.

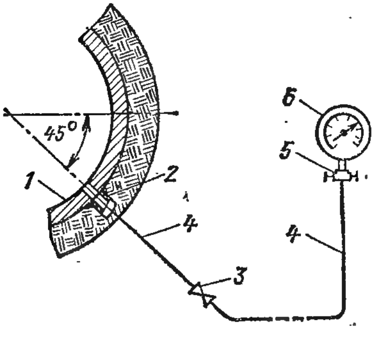


Рис. 13-3-4. Схема установки манометра на стене для измерения давления в трубопроводе при $p_у = 100 \div 400$ кгс/см², $t > 70$°C.

1 — трубопровод с изоляцией; *2* — штуцер; *3* — запорный вентиль; *4* — соединительная линия; *5* — трехходовый вентиль; *6* — манометр.

При измерении пульсирующего давления, например, в напорной линии насоса необходимо перед манометром в соединительную линию устанавливать дроссель для сглаживания пульсаций. В не-

которых случаях колебательный режим работы манометра при пульсирующем давлении можно устранить с помощью дополнительной емкости или трехходового вентиля.

13-4. Разделители жидкостные и мембранные

Передача давления (избыточного или вакуумметрического) к манометру, мановакуумметру или вакуумметру через разделитель жидкостный или мембранный производится в тех случаях, когда свойства среды, давление которой измеряется, или условия эксплуатации не позволяют осуществить непосредственное присоединение прибора к отборному устройству. Ниже рассмотрим наиболее часто встречающиеся случаи измерения давления среды с применением разделителей жидкостных и мембранных.

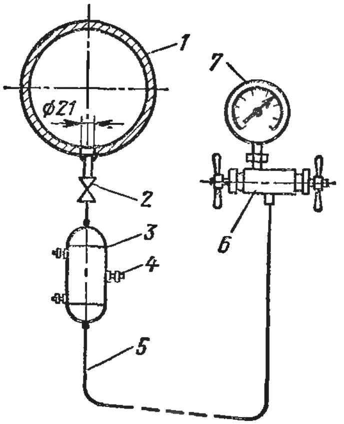


Рис. 13-4-1. Схема установки манометра для измерения давления в мазутопроводе при $p_y \leqslant 64$ кгс/см².

1 — мазутопровод; *2* — запорный вентиль; *3* — разделительный сосуд; *4* — ниппель; *5* — соединительная линия; *6* — трехходовый вентиль; *7* — манометр.

При измерении давления в мазутопроводе манометр присоединяют к отборному устройству через разделитель жидкостный или так называемый разделительный сосуд, который предохраняет внутреннюю полость упругого чувствительного элемента прибора от попадания в нее мазута. На рис. 13-4-1 показана схема установки манометра для измерения давления в мазутопроводе. Разделительный сосуд должен располагаться максимально близко к запорному вентилю отборного устройства. В качестве разделительной жидкости, заливаемой в сосуд и соединительную линию, при измерении давления мазута применяют воду. Разделительный сосуд заливают водой до половины высоты его. Для контроля уровня воды в сосуде служит средний ниппель.

Если при измерении давления мазута манометр будет установлен выше мазутопровода, то в верхней точке соединительной линии должен быть установлен газосборник.

При измерении давления агрессивных, кристаллизующих и некоторых других сред манометры, вакуумметры и мановакуумметры присоединяют к отборным устройствам через разделители мембранного типа РМ, выпускаемые заводом «Манометр». Мембранные разделители моделей 5319 и 5320 применяются с приборами, имеющими следующий верхний предел измерений: избыточного давления — от 0,25 до 25 кгс/см²; вакуумметрического давления — от 0,25 до 1 кгс/см². Разделители моделей 5321 и 5322 применяются с мано-

метрами, предназначенными для измерения избыточного давления от 40 до 600 кгс/см².

На рис. 13-4-2 показаны схема установки манометра в комплекте с мембранным разделителем для измерения давления агрессивной среды и устройство разделителя (модель 5321). Верхнее внутреннее пространство разделителя заполняют кремнийорганической жидкостью (согласно инструкции завода «Манометр»). Заводом «Манометр» выполняются мембранные разделители, у которых сторона мембраны, соприкасающаяся со средой, давление которой измеряется, закрыта пленкой фторопласта, а прокладка изготовлена из фторопласта.

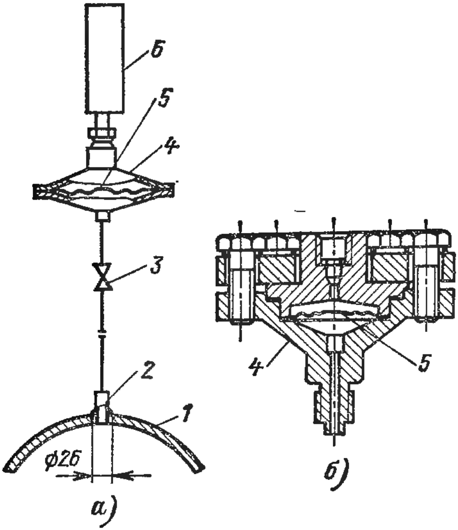


Рис. 13-4-2. Схема установки манометра для измерения давления агрессивной среды (*а*) и разделитель мембранный типа РМ, модель 5321 (*б*).

1 — трубопровод; *2* — штуцер; *3* — вентиль запорный игольчатый; *4* — разделитель мембранный; *5* — мембрана; *6* — манометр.

При измерении давления среды, температура которой выходит за пределы расширенной области значений температур для данного прибора, но не выше 100°С, прибор должен соединяться с мембранным разделителем с помощью гибкого рукава (модель 5326). Приборы давления с электросиловым и пневмосиловым преобразователями во всех случаях соединяются с разделителем посредством гибкого рукава.

При применении мембранных разделителей необходимо иметь в виду, что они вносят дополнительную погрешность, которая не превышает при верхних пределах измерений от 0,6 до 600 кгс/см² ± 1% диапазона измерений, а при верхних пределах измерений 0,25 и 0,4 кгс/см² ± 2%.

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗА, ПАРА И ТЕПЛА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЕДИНИЦЫ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

При измерениях, связанных с учетом количества жидкостей, газа и пара, и оперативным контролем, регулированием и управлением технологическими процессами в различных отраслях промышленности, приходится определять наряду с другими величинами количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени или за какой-то промежуток времени. Количество вещества выражают обычно в единицах объема или массы. Единицами объема являются кубический метр (м^3) и литр (л), а массы — килограмм (кг) и тонна (т).

Прибор, измеряющий количество вещества, протекающее через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени (смену, сутки и т. д.), называют счетчиком количества. При этом количество вещества определяется как разность двух последовательных показаний счетчика в начале и конце этого промежутка. Показания счетчика выражаются в единицах объема, а иногда — в единицах массы.

Прибор, измеряющий расход, т. е. количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени — час (ч), называют расходомером. Если прибор, снабженный интегрирующим устройством со счетчиком, служит для одновременного измерения расхода и количества вещества, то его называют расходомером со счетчиком.

Объемный расход, обозначаемый через $Q_о$, и массовый расход, обозначаемый через $Q_м$, выражают в следующих единицах: кубический метр в секунду (м^3/с); кубический метр в час (м^3/ч); литр в час (л/ч) и килограмм в секунду (кг/с); килограмм в час (кг/ч); тонна в час (т/ч) соответственно. Допускаются единицы, выраженные в объеме или массе, отнесенные к минуте (мин).

Для получения сравнимых результатов измерений расход газа, выраженный в единицах объема, приводят к нормальным условиям. При промышленных измерениях нормальными условиями считаются температура $t_н = 20°C$, давление $p_н = 1{,}0332$ кгс/см^2 (101 325 Па), относительная влажность $\varphi = 0$ (ГОСТ 2939-63). В этом случае объемный расход газа, обозначаемый через $Q_н$, выражают в м^3/ч.

Применять неправильное наименование и обозначение единицы расхода газа, включающее указания условий измерения в нм^3/ч (нормальный кубический метр в час), нельзя. Указание на вид измеряемой величины (объемный расход газа при нормальных

условиях) должно входить в наименование этой величины (например, $Q_н$), а не в обозначение единицы величины.

В данном разделе будут рассмотрены метод измерения расхода жидкостей, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве с помощью дифманометра; метод измерения расхода среды напорной трубкой, а также приборы: расходомеры постоянного перепада давления; тахометрические расходомеры и счетчики количества жидкостей, электромагнитные расходомеры, получившие широкое применение в энергетике и других отраслях промышленности.

Кроме рассматриваемых в данном разделе находят иногда применение и другие методы измерения расхода [59].

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗА И ПАРА ПО ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЯ В СУЖАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ

14-1. Основы теории и уравнения расхода

Общие сведения. Одним из наиболее распространенных и изученных является способ измерения расхода жидкостей, газов и пара в трубопроводах по перепаду давления в сужающем устройстве. Сужающее устройство выполняет функции первичного преобразователя, устанавливается в трубопроводе и создает в нем местное сужение, вследствие чего при протекании вещества повышается скорость в суженном сечении по сравнению со скоростью потока до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии потока в суженном сечении. Соответственно статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства. Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$ (рис. 14-1-1), зависящий от скорости потока и, следовательно, расхода жидкости. Отсюда следует, что перепад давления, создаваемый сужающим устройством, может служить мерой расхода вещества, протекающего в трубопроводе, а численное значение расхода вещества может быть определено по перепаду давления Δp, измеренному дифманометром.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара широко применяют стандартные диафрагмы, сопла и сопла Вентури. В особых случаях измерения расхода находят также применение не нормализованные типы сужающих устройств.

Диафрагма показана на рис. 14-1-1, *а* и представляет собой тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр которого лежит на оси трубы. Сужение потока начинается до диафрагмы, и на некотором расстоянии за диафрагмой поток достигает минималь-

ного сечения. Далее поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. На рис. 14-1-1, *а* сплошной линией представлена кривая, характеризующая распределение давлений вдоль стенки трубопровода; кривая, изображенная штрихпунктирной линией, характеризует распределение давлений по оси трубопровода. Как видно, давление за диафрагмой полностью не восстанавливается.

При протекании вещества через диафрагму за ней в углах образуется мертвая зона, в которой вследствие разности давлений возникает обратное движение жидкости или так называемый вторичный поток. Вследствие вязкости жидкости струйки основного и вторичного потоков, двигаясь в противоположных направлениях, свертываются в виде вихрей. На вихреобразования за диафрагмой затрачивается значительная часть энергии, а следовательно, имеет место и значительная потеря давления. Изменение направления струек перед диафрагмой и сжатие струи после диафрагмы имеют незначительное влияние.

Как видно из рис. 14-1-1, *а*, отбор давлений p_1 и p_2 осуществляется с помощью двух отдельных отверстий, расположенных непосредственно до и после диска диафрагмы в углах, образуемых плоскостью диафрагмы и внутренней поверхностью трубопровода. Другие способы отбора давлений p_1 и p_2 описаны ниже.

Сопло (рис. 14-1-1, *б*) выполнено в виде насадки с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавно сужающуюся

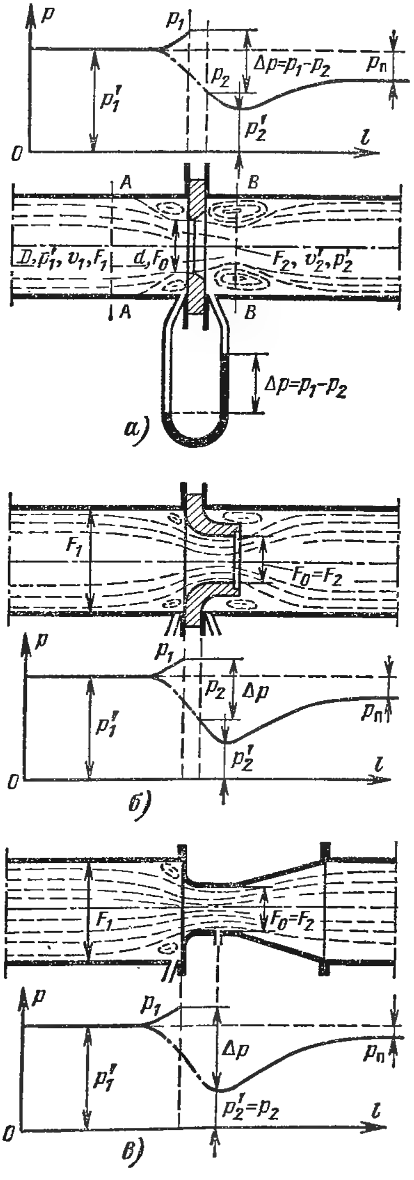


Рис. 14-1-1. Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе диафрагмы (*а*), сопла (*б*) и сопла Вентури (*в*).

часть на входе и развитую цилиндрическую часть на выходе. Профиль сопла обеспечивает достаточно полное сжатие струи, и площадь цилиндрического отверстия сопла может быть принята равной минимальному сечению струи ($F_0 = F_2$). Вихреобразование за соплом вызывает меньшую потерю энергии, чем у диафрагмы. Кривые изменения давления вдоль стенки и по оси трубопровода (пунктирная линия) имеют тот же характер, что и для диафрагмы, но остаточная потеря давления $p_п$ для сопла немного меньше, чем для диафрагмы. Однако следует отметить, что при равных перепадах давления для одного и того же расхода площадь проходного отверстия F_0 для диафрагмы больше, чем для сопла, поэтому потеря давления в этом случае практически одинакова. Отбор давлений p_1 и p_2 до и после сопла осуществляется так же, как и у диафрагмы.

На рис. 14-1-1, *в* представлено сопло Вентури, которое состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок, и из расширяющейся конической части — диффузора. В этой форме сужающего устройства главным образом благодаря наличию выходного диффузора потеря давления значительно меньше, чем у диафрагм и сопла (рис. 14-1-1, *в*). Отбор давлений p_1 и p_2 осуществляется с помощью двух кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью сопла Вентури группой равномерно расположенных по окружности отверстий.

Принцип измерения расхода вещества по перепаду давления, создаваемому сужающим устройством, и основные уравнения одинаковы для всех типов сужающих устройств, различны лишь некоторые коэффициенты в этих уравнениях, определяемые опытным путем.

Уравнения расхода для несжимаемой жидкости. Рассмотрим поток жидкости и предположим, что в сечениях *A—A* и *B—B* (рис. 14-1-1, *а*) скорости по всему сечению равны средней скорости и направлены параллельно оси горизонтально расположенной трубы.

Пользуясь общим уравнением закона сохранения энергии

$$\int v\,dv = -\int \frac{dp}{\rho} \tag{14-1-1}$$

для случая несжимаемой жидкости ($\rho = \rho_1 = \rho_2 = \text{const}$) получим:

$$p_1' - p_2' = \frac{\rho}{2}\left(v_2'^2 - v_1^2\right), \tag{14-1-2}$$

где p_1' и p_2' — абсолютные давления в сечениях *A—A* и *B—B* соответственно, Па; ρ — плотность протекающей жидкости перед сужающим устройством, кг/м^3; v_1 и v_2' — средние скорости потока жидкости в сечениях *A—A* и *B—B* соответственно, м/с.

Согласно условию непрерывности струи для несжимаемой жидкости

$$F_1 v_1 = F_2 v_2'. \tag{14-1-3}$$

Площадь поперечного сечения струи F_2 можно выразить через площадь отверстия сужающего устройства F_0 и коэффициент сужения струи μ:

$$F_2 = \mu F_0. \qquad (14\text{-}1\text{-}4)$$

Подставив значение F_2 в уравнение (14-1-3), найдем:

$$v_1 = \mu v_2' \frac{F_0}{F_1},$$

или

$$v_1 = \mu v_2' m, \qquad (14\text{-}1\text{-}5)$$

где F_0 — площадь отверстия сужающего устройства при рабочей температуре, м^2; F_1 — площадь сечения трубопровода при рабочей температуре, м^2; m — относительная площадь (ранее называемая модулем) сужающего устройства ($m = F_0/F_1 = d^2/D^2$, здесь d и D — соответственно диаметр отверстия сужающего устройства и трубопровода при рабочей температуре, м) [1].

Пользуясь уравнениями (14-1-2) и (14-1-5), определяем среднюю скорость v_2' в сечении F_2:

$$v_2' = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1' - p_2')}. \qquad (14\text{-}1\text{-}6)$$

Давления p_1' и p_2' отнесены к сечениям A—A и B—B; в большинстве же случаев давления измеряют непосредственно в углах до и после сужающего устройства. Кроме того, в реальном потоке вследствие вязкости и трения жидкости о стенки имеет место потеря энергии и скорости в различных точках сечения. Поэтому при переходе к действительным условиям, а также вследствие замены давлений p_1' и p_2' давлениями p_1 и p_2 (рис. 14-1-1, *а*, *б*) в формулу (14-1-6) вводят поправочный коэффициент ξ и уравнение для средней скорости v_2 в наиболее узком сечении потока принимает вид:

$$v_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}. \qquad (14\text{-}1\text{-}7)$$

Секундный расход в единицах массы для несжимаемой жидкости может быть найден по уравнению

$$Q_м = v_2 \rho F_2 = \mu v_2 \rho F_0$$

или

$$Q_м = \frac{\mu\xi}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}. \qquad (14\text{-}1\text{-}8)$$

Коэффициенты μ и ξ не могут быть определены с достаточной точностью независимо друг от друга. Поэтому их объединяют в один общий коэффициент

$$\alpha = \frac{\mu\xi}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}}, \qquad (14\text{-}1\text{-}9)$$

[1] ГОСТ 18083-72.

который называют коэффициентом расхода и определяют экспериментальным путем.

Таким образом, уравнения расхода для несжимаемой жидкости принимают вид:

$$Q_м = \alpha F_0 \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}; \qquad (14\text{-}1\text{-}10)$$

$$Q_0 = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}, \qquad (14\text{-}1\text{-}11)$$

где $Q_о = Q_м / \rho$ — расход в единицах объема, м^3/с.

Уравнения расхода для сжимаемой жидкости. В случае измерения расхода сжимаемой жидкости (газа или пара) необходимо учитывать изменение плотности вещества в связи с изменением давления при протекании через сужающее устройство. При этом с достаточной степенью точности можно считать, что изменение состояния газа или пара описывается уравнением адиабатического процесса, т. е.

$$p = C\rho^k, \qquad (14\text{-}1\text{-}12)$$

где k — показатель адиабаты; C — постоянная величина.

Полагая в уравнении (14-1-1)

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{\rho} = \left(\frac{C}{p}\right)^{1/k},$$

получаем:

$$(v_2')^2 - v_1^2 = 2C^{1/k} \frac{k}{k-1} (p_1')^{\frac{k-1}{k}} \left[1 - \left(\frac{p_2'}{p_1'}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \qquad (14\text{-}1\text{-}13)$$

Подставляя на основании уравнения (14-1-12) в уравнение (14-1-13) значение

$$C^{1/k} = \frac{p_1^{1/k}}{\rho},$$

получаем:

$$(v_2')^2 - v_1^2 = 2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1'}{\rho} \left[1 - \left(\frac{p_2'}{p_1'}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \qquad (14\text{-}1\text{-}14)$$

Уравнение непрерывности потока сжимаемой жидкости для сечений F_1 и F_2 имеет вид:

$$\rho v_1 F_1 = \rho_2 v_2' F_2 = \rho_2 v_2' \mu_к F_0, \qquad (14\text{-}1\text{-}15)$$

где через $\mu_к$ обозначен коэффициент сужения, который отличается от коэффициента сужения для несжимаемой жидкости, так как он зависит от отношения давлений p_2/p_1. Это происходит потому, что вследствие отсутствия боковых стенок, особенно у диафрагм, газ или пар может расширяться в радиальном направлении. Следо-

вательно, наименьшее сечение струи потока для сжимаемой жидкости за диафрагмой будет несколько больше, чем для несжимаемой жидкости, так как сжимаемая жидкость будет несколько увеличиваться в объеме вследствие уменьшения давления за сужающим устройством.

Решая уравнение (14-1-15) относительно v_1, получаем:

$$v_1 = \mu_к v_2' \frac{\rho_2}{\rho} \frac{F_0}{F_1} = \mu_к v_2' \left(\frac{p_2'}{p_1'}\right)^{1/k} m. \qquad (14\text{-}1\text{-}16)$$

Решая совместно уравнения (14-1-14) и (14-1-16), находим среднюю скорость v_2' для сечения F_2:

$$v_2' = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_К^2 m^2 \left(\frac{p_2'}{p_1'}\right)^{2/k}}} \sqrt{\frac{2p_1'}{\rho} \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2'}{p_1'}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \qquad (14\text{-}1\text{-}17)$$

Как и для несжимаемой жидкости, введем коэффициент ξ, после чего уравнение расхода в единицах массы для сжимаемой жидкости примет вид:

$$Q_м = \mu_к \rho_2 v_2 F_0 = \frac{\mu_к \xi}{\sqrt{1 - \mu_К^2 m^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}}} F_0 \sqrt{\frac{2\rho_2^2}{\rho} p_1 \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}.$$

Подставляя в правую часть этого уравнения значение

$$\rho_2 = \rho \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/k},$$

получаем:

$$Q_м = \frac{\mu_к \xi}{\sqrt{1 - \mu_К^2 m^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}}} F_0 \sqrt{2\rho \frac{k}{k-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}.$$

(14-1-18)

Уравнение (14-1-18) можно представить в виде, аналогичном уравнению для несжимаемой жидкости, что более удобно для практических целей:

$$Q_м = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho \Delta p}; \qquad (14\text{-}1\text{-}19)$$

$$Q_0 = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}, \qquad (14\text{-}1\text{-}20)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ — перепад давления в сужающем устройстве, Па; ε — поправочный множитель на расширение измеряемой среды,

равный:

$$\varepsilon=\frac{\alpha_{к}}{\alpha}\sqrt{\frac{1-\mu_{к}^{2}m^{2}}{1-\mu_{к}^{2}m^{2}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}}}\sqrt{\frac{p_1}{p_1-p_2}\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}; \qquad (14\text{-}1\text{-}21)$$

здесь

$$\alpha_{к}=\frac{\mu_{к}\xi}{\sqrt{1-\mu_{к}^{2}m^{2}}}. \qquad (14\text{-}1\text{-}22)$$

Уравнения (14-1-19) и (14-1-20) отличаются от уравнений для несжимаемой жидкости (14-1-10) и (14-1-11) только поправочным множителем на расширение измеряемой среды. Поэтому уравнения (14-1-19) и (14-1-20) действительны также для несжимаемой жидкости, поскольку для нее поправочный множитель ε равен единице. Отсюда следует, что одним и тем же значением коэффициента расхода можно пользоваться как для несжимаемых, так и для сжимаемых жидкостей.

Следует отметить, что выведенные уравнения расхода могут применяться в том случае, когда скорость потока в сужающем устройстве не достигает критической, т. е. скорости звука в данной среде.

Наименьшее сечение струи в случае сопл и сопл Вентури может быть принято равным сечению цилиндрической части этих сужающих устройств, т. е. $\mu=\mu_{к}=1$, поэтому радиальное расширение струи можно не принимать во внимание, а следовательно, $\alpha_{к}=\alpha$. Таким образом, поправочный множитель на расширение ε для сопл и сопл Вентури может быть подсчитан по уравнению (14-1-21). Для диафрагм поправочный множитель на расширение ε должен быть определен экспериментально.

14-2. Стандартные сужающие устройства

Всесторонние исследования сужающих устройств дали возможность нормализовать диафрагмы, сопла и сопла Вентури, что позволило изготовлять и применять их в комплекте с дифманометрами для измерения расхода и количества жидкостей, газов и паров в горизонтальных, наклонных и вертикальных круглых трубопроводах по результатам расчета без индивидуальной градуировки. При изготовлении и установке стандартных сужающих устройств в трубопроводах должны соблюдаться определенные требования, основные из которых рассматриваются ниже [1].

Диафрагма. Стандартная диафрагма может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром $D_{20}\geqslant 50$ мм при одно-

[1] Подробные сведения о требованиях, предъявляемых к устройству и применению стандартных сужающих устройств, см. [61] и ГОСТ 14321-73, ОСТ 24.839.03, ОСТ 24.839.04 и ОСТ 24.462.07.

временном соблюдении условия $0{,}05 \leqslant m \leqslant 0{,}7$. Диафрагма является наиболее простой конструкцией из числа сужающих устройств.

Стандартная диафрагма схематически показана на рис. 14-2-1. Она представляет собой тонкий диск, имеющий круглое отверстие диаметром d_{20}, центр которого совпадает с центром сечения трубы. Отверстие диафрагмы цилиндрической формы со стороны входа потока имеет прямоугольную кромку. Длина цилиндрического отверстия a должна находиться в пределах $0{,}005\,D_{20} \leqslant a \leqslant 0{,}02D_{20}$, а при $m > 0{,}5$ длина должна равняться примерно $b/3$. При толщине диафрагмы $b > 0{,}02\,D_{20}$ цилиндрическое отверстие должно выполняться с коническим расширением к выходу потока (рис. 14-2-1, *а*). Угол φ наклона, образующий конус к оси диафрагмы, должен лежать в пределах от 30 до 45°. В тех случаях, когда толщина $b \leqslant \leqslant 0{,}02\,D_{20}$, можно изготовлять диафрагму и без конического расширения со стороны выхода потока (рис. 14-2-1, *б*), что имеет место обычно для больших диаметров трубопроводов ($D_у \geqslant 450$ мм) и при небольших давлениях среды.

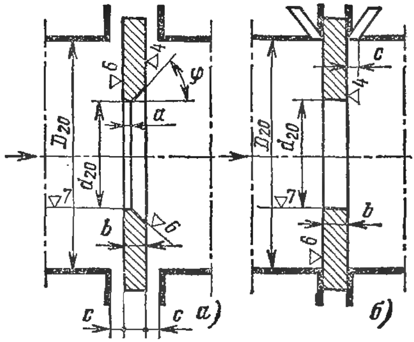


Рис. 14-2-1. Стандартная диафрагма (стрелкой показано направление потока).

а — с коническим расширением к выходу потока; *б* — без конического расширения со стороны выхода потока.

Толщина b стандартной диафрагмы не должна превышать $0{,}05\,D_{20}$. В большинстве случаев при применении диафрагм нецелесообразно иметь толщину ее менее 2,5—3 мм и больше 10—15 мм. Наименьшая необходимая толщина диска b при перепаде давления $\Delta p \geqslant 1600$ кгс/м^2 должна определяться расчетным путем, исходя из условий механической прочности диафрагмы [61].

Шероховатость поверхностей диафрагмы должна соответствовать классам чистоты, указанным на рис. 14-2-1. На входной и выходной кромках отверстия диафрагмы не должно быть зазубрин, заусенцев и т. п. Особое внимание при изготовлении диафрагмы должно быть обращено на обработку входной кромки: она должна быть острой и не должна иметь закруглений, царапин и т. п. Точность выполнения входной кромки диафрагмы должна увеличиваться с уменьшением диаметра отверстия d_{20}. У диафрагм, диаметр отверстия которых не превышает 125 мм, острота кромки должна быть такой, чтобы падающий на нее луч света не давал отражения. Если $d > 125$ мм, то луч света может отражаться, но кромка не должна иметь заметного невооруженным глазом притупления.

Отбор давлений p_1 и p_2 можно осуществлять при помощи отдельных цилиндрических отверстий в обойме (рис. 14-2-2), кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью тру-

бопровода группой равномерно расположенных по окружности прямоугольных отверстий (рис. 14-2-3).

Диафрагмы с кольцевыми камерами более удобны в эксплуатации, особенно при наличии местных возмущений потока или в тех случаях, когда поток не вполне симметричен благодаря наличию изгибов трубопровода или других препятствий. Следует также отметить, что кольцевые камеры, способствующие выравниванию давления, позволяют более точно измерять перепад давления при меньших длинах прямых участков, чем отдельные отверстия.

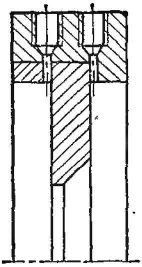


Рис. 14-2-2. Диафрагма в обойме с отдельными отверстиями.

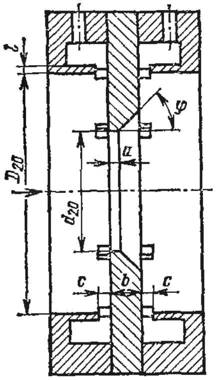


Рис. 14-2-3. Диафрагма с кольцевыми камерами.

Отбор давлений p_1 и p_2 можно также осуществлять при помощи кольцевых камер, образованных полостью двух трубок, согнутых вокруг трубопровода в кольцо или прямоугольник. Такой способ рекомендуется применять при давлениях среды $p \leqslant 16$ кгс/см² в трубопроводах с условным диаметром $D_у \geqslant 450$ мм.

Диафрагма с отбором давлений p_1 и p_2 с помощью двух отдельных отверстий в трубопроводе или «теле» каждого из фланцев (см. рис. 14-2-1, *б*) может быть использована в трубопроводах с условным диаметром $D_у$ от 450 до 1600 мм при рабочих давлениях и температурах, соответствующих условным давлениям $p_у$ до 16 кгс/см² (1,6 МПа).

Для обеспечения выравнивания давления в кольцевой камере диафрагмы необходимо, чтобы площадь $F_к$ диаметрального сечения камеры, определенная по одну сторону от оси трубопровода, была не менее половины площади группы отверстий, соединяющих камеру с внутренней полостью трубопровода.

Таким образом для кольцевой камеры, выполненной по схеме рис. 14-2-3,

$$F_к \geqslant \frac{1}{2} nf, \qquad (14\text{-}2\text{-}1)$$

где n — число отверстий; f — площадь одного отверстия, которая должна быть не менее 12 мм².

Определяя ширину кольцевой щели c при наличии прокладки у камерной диафрагмы, необходимо учитывать сжимаемость прокладки. Если кольцевая камера соединяется с внутренней полостью трубопровода группой отверстий при наличии кольцевой щели, обусловленной установкой прокладки, то при определении необходимой площади $F_к$ площадь щели, остающейся после сжатия прокладки, должна учитываться, если ширина этой щели превышает 0,25 мм.

Для кольцевой камеры, выполненной из согнутых вокруг трубопровода трубок, площадь $F_к$ определяется по формуле

$$F_к = \frac{\pi d_т^2}{4} \geqslant \frac{1}{2} nf, \qquad (14\text{-}2\text{-}2)$$

где $d_т$ — внутренний диаметр трубки, образующий кольцо или прямоугольник.

Число отверстий, соединяющих каждую кольцевую камеру с полостью трубопровода (рис. 14-2-3), должно быть не менее 4. Диаметр отверстия или ширина кольцевой щели, соединяющих камеру с трубопроводом, и диаметр отдельного отверстия (размер c) не должны превышать 0,03 D_{20} при $m \leqslant 0{,}45$, а при $m > 0{,}45$ должны находиться в пределах $0{,}01\,D_{20} \leqslant c \leqslant 0{,}02\,D_{20}$. Нижний предел размера c, равный 0,01 D_{20}, допускается только для $D_{20} \leqslant 1000$ мм.

Кроме того, должны соблюдаться следующие условия: для чистых жидкостей и газов при измерении перепада давления через отдельные отверстия и кольцевые камеры $1 \leqslant c \leqslant 10$ мм; для паров, влажных газов и жидкостей, которые могут испаряться в соединительных (импульсных) линиях, при измерении перепада давления через кольцевые камеры, $1 \leqslant c \leqslant 10$ мм, а при измерении через отдельные отверстия $4 \leqslant c \leqslant 10$ мм. Обычно диаметр отдельного отверстия выполняют не менее 3 мм для чистых жидкостей и газов и не менее 5 мм в остальных случаях. Следует отметить, что при $D_{20} < 150$ мм совместное удовлетворение указанных выше требований при изготовлении диафрагм с отдельными отверстиями затруднительно. Поэтому в таких случаях лучше применять камерные диафрагмы.

Внутреннюю кромку отверстия (в кольцевой камере, обойме, фланце или трубопроводе) рекомендуется закруглять по радиусу, не превышающему 0,1 c, кроме того, кромка должна быть без заусенцев. Толщина l стенки корпуса кольцевой камеры (рис. 14-2-3) или длина цилиндрической части отдельного отверстия (рис. 14-2-2) должна быть не менее 2 c.

Отклонение действительного диаметра d_{20} отверстия диафрагмы от среднего значения, определенное не менее чем в четырех равно отстоящих друг от друга диаметральных направлениях, не должно превышать 0,05% d_{20}. При $m < 0{,}4$ допускается отклонение в 0,1% d_{20}. Указанные допуски на диаметр проходного отверстия диафрагмы остаются в силе для сопл и сопл Вентури, рассматриваемых ниже. При этом для них диаметр d_{20} должен определяться в начале и в конце цилиндрической части отверстия. Внутренний диаметр D_{20} корпуса кольцевой камеры (рис. 14-2-3) или обоймы (рис. 14-2-2) должен быть равен (с допустимым отклонением +1%) диаметру трубопровода, принятому для расчета диафрагмы, сопла или сопла Вентури.

Стандартные диафрагмы с кольцевыми камерами типа ДК (рис. 14-2-3), предназначенные для трубопроводов с условными проходами $D_у = 50 \div 500$ мм (ГОСТ 355-67) и рабочих давлений и температур, соответствующих условным давлениям $p_у$ до 100 кгс/см^2 (~10 МПа), должны изготовляться по ГОСТ 14321-73.

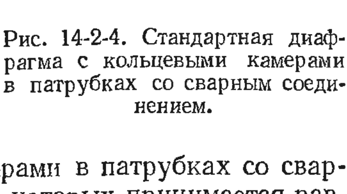


Рис. 14-2-4. Стандартная диафрагма с кольцевыми камерами в патрубках со сварным соединением.

Диафрагмы бескамерные, предназначенные для трубопроводов с условными проходами $D_у = 400 \div 1600$ мм, на условные давления $p_у$ до 25 кгс/см^2 (2,5 МПа) изготовляют по ГОСТ 14322-69.

На рис. 14-2-4 показан пример конструктивного выполнения стандартной диафрагмы с кольцевыми камерами в патрубках со сварным соединением, внутренний диаметр которых принимается равным внутреннему диаметру трубопровода. Сварные соединения с измерительными диафрагмами, применяемые для неагрессивных сред, предназначены для рабочих давлений и температур, соответствующих условным давлениям $p_у$ от 100 до 400 кгс/см^2 (10—40 МПа). Кольцевые камеры соединяются с внутренними полостями патруб-

ков с помощью восьми прямоугольных отверстий, равномерно распределенных по окружности.

Диафрагмы этого типа широко применяются на тепловых электрических станциях высокого давления, например, для измерения расхода питательной воды парогенераторов. Сварная конструкция диафрагм может быть использована на атомных электрических станциях и на других промышленных предприятиях.

Сопло. Стандартное сопло, схематически показанное на рис. 14-2-5, может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром $D_{20} \geqslant 50$ мм при одновременном соблюдении условия $0{,}05 \leqslant m \leqslant 0{,}65$. Профильная часть отверстия сопла со стороны входа потока должна быть выполнена с плавным сопряжением дуг радиусами $r_1 = 0{,}2\,d_{20}$ и $r_2 = d_{20}/3$. Дуга, проведенная радиусом r_2, должна сопрягаться с выходной цилиндрической частью сопла. У сопла (рис. 14-2-5, *б*) дуга, проведенная радиусом r_1, доходит только до точки на торце сопла, лежащей на диаметре D_{20}. Отклонение радиусов дуг от номинальных значений не должно превышать 10% при $m \leqslant 0{,}25$ и 3% при $m > 0{,}25$.

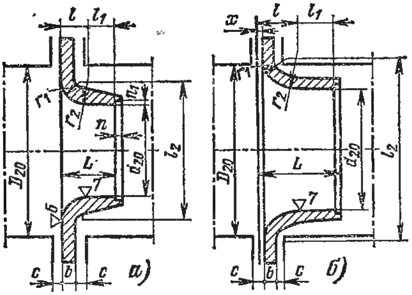


Рис. 14-2-5. Стандартное сопло.

а — для $m \leqslant 0{,}444$; *б* — для $m > 0{,}444$. Размеры: $l = 0{,}304\ d_{20}$; $l_1 = 0{,}3\,d_{20}$; $l_2 = 1{,}5\,d_{20}$; $L = 0{,}604\ d_{20}$; $b \leqslant 0{,}1\ D_{20}$;

$$x = 0{,}2\,d_{20} - \sqrt{0{,}75\,d_{20}D_{20} - 0{,}25\,D_{20}^2 - 0{,}5225\,d_{20}^2}.$$

На выходе цилиндрическая часть отверстия сопла должна заканчиваться расточкой ($n \leqslant 0{,}03\,d_{20}$ и $n_1 \leqslant 0{,}03\,d_{20}$), предохраняющей выходную кромку от повреждений. Выходная кромка должна быть острой и не должна иметь закруглений, фасок, заусенцев и т. п. Шероховатость рабочих поверхностей сопла должна соответствовать классам чистоты, указанным на рис. 14-2-5. Значения любых двух диаметров, полученные при измерении в плоскости, перпендикулярной к оси сопла, не должны отличаться от среднего значения более чем на 0,1%.

Измерение перепада давления в сопле может производиться через две кольцевые камеры или через отдельные цилиндрические отверстия. Отбор давлений через кольцевые камеры, как отмечалось выше, более предпочтителен, чем отбор давлений через отдельные отверстия. Требования, предъявляемые к устройству кольцевых камер и выполнению отверстий (размер *c*) для отбора давлений, те же, что и для диафрагм. Поэтому при изготовлении кольцевых камер или отдельных отверстий необходимо руководствоваться указаниями, изложенными выше при рассмотрении диафрагм.

На рис. 14-2-6 показан пример конструктивного выполнения стандартного сопла с кольцевыми камерами в патрубках со сварным соединением, внутренний диаметр которых должен быть равен

внутреннему диаметру трубопровода. Сварные соединения этого типа с измерительными соплами, применяемые для неагрессивных сред, предназначены для рабочих давлений и температур, соответствующих условным давлениям от 100 до 400 кгс/см^2 (от 10 до 40 МПа). Кольцевые камеры соединяются с внутренними полостями патрубков с помощью восьми прямоугольных отверстий, равномерно распределенных по окружности.

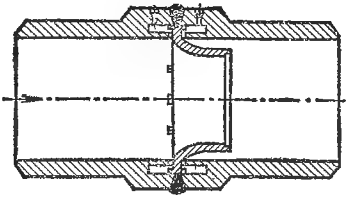


Рис. 14-2-6. Стандартное сопло с кольцевыми камерами в патрубках со сварным соединением ($m > 0{,}444$).

Сварные соединения с измерительными соплами широко применяются на тепловых электрических станциях для измерения расхода перегретого водяного пара высокого давления. Сопла этого типа могут быть использованы также на атомных электрических станциях и в других отраслях промышленности.

Сопло менее чувствительно к загрязнению и коррозии. Загрязнение или незначительное изменение входного профиля сужающего устройства в процессе эксплуатации влияет на коэффициент расхода сопла в значительно меньшей степени, чем на коэффициент расхода диафрагмы. При одних и тех же значениях m и перепадах давления сопло позволяет измерять больший расход вещества, чем диафрагма. Кроме того, при измерении расхода пара и газа сопло обеспечивает более высокую точность измерения по сравнению с диафрагмой.

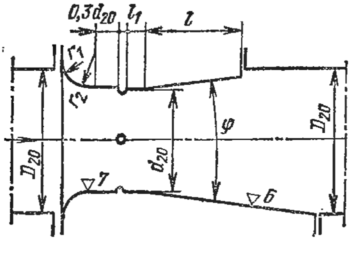


Рис. 14-2-7. Стандартное сопло Вентури для $m > 0{,}444$ (верхняя половина — короткое, нижняя половина — длинное).

Сопло Вентури. Из числа существующих форм труб Вентури нормализована труба с входной частью, выполненной так же, как и стандартное сопло. Поэтому сужающее устройство этого типа получило название стандартное сопло Вентури. Оно может быть изготовлено с длинным и коротким диффузором (конусом). У длинного сопла Вентури диффузор на выходе имеет диаметр, равный диаметру трубопровода (рис. 14-2-7, нижняя часть). Короткое сопло Вентури имеет диаметр на выходе у диффузора меньше диаметра трубопровода (рис. 14-2-7, верхняя часть). Сопло Вентури, профили которого показаны на рис. 14-2-7, может применяться без градуировки для измерения расхода различных сред в трубопроводах диаметром $D_{20} \geqslant 50$ мм при одновременном соблюдении условия $0{,}05 \leqslant m \leqslant 0{,}6$.

Входная часть сопла Вентури при $m \leqslant 0{,}444$ выполняется по рис. 14-2-5, *а*, а при $m > 0{,}444$ — по рис. 14-2-5, *б*. Выходная цилиндрическая часть сопла Вентури, как видно из рис. 14-2-7,

соединена с диффузором, угол конусности которого должен удовлетворять условию $5° \leqslant \varphi \leqslant 30°$. У сопла Вентури с коротким диффузором длина его l должна быть не менее D_{20}.

Отбор давлений p_1 и p_2 должен производиться через кольцевые камеры. Длина l_1 (рис. 14-2-7) должна находиться в пределах $0,2d_{20} \leqslant l_1 \leqslant 0,4\,d_{20}$. Необходимая длина внутри этих пределов берется в зависимости от размеров кольцевой камеры для отбора давления p_2. Эта камера соединяется с внутренней цилиндрической полостью сопла Вентури при помощи отверстий, равномерно расположенных по окружности. Число отверстий должно быть не меньше четырех. Диаметр этих отверстий не должен превышать $0,13\,d_{20}$ и не быть меньше 3 мм.

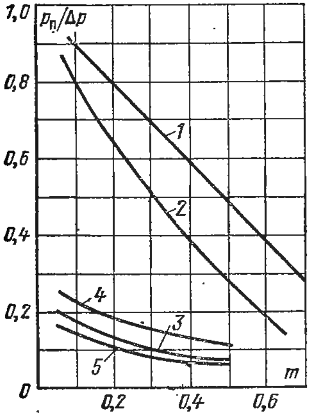


Рис. 14-2-8. Потеря давления в сужающем устройстве.

1 — диафрагма; *2* — сопло; *3* — короткое сопло Вентури ($l = D_{20}$, φ — любое значение); *4* — длинное сопло Вентури ($\varphi = 14 \div 15°$); *5* — длинное сопло Вентури ($\varphi = 5 \div 7°$).

Кольцевая камера для отбора давления p_1 соединяется с внутренней полостью трубы с помощью кольцевой щели или группы отверстий, равномерно расположенных по окружности. Требования, предъявляемые к устройству кольцевых камер для отбора давлений, те же, что и для диафрагм.

Потеря давления. При выборе сужающего устройства следует считаться с потерей давления измеряемой среды, так как давление за сужающим устройством, как видно из рис. 14-1-1, полностью не восстанавливается. Потерю давления измеряемой среды, протекающей через сужающее устройство, определяют как разность статических давлений, измеренных в двух ближайших поперечных сечениях, в которых как до, так и после сужающего устройства не наблюдается его влияния на характер потока. Потеря давления $p_п$ в сужающем устройстве обычно выражается в долях или процентах перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2$.

Зависимость потери давления от m и типа сужающего устройства в долях от перепада давления приведена на рис. 14-2-8. Из графика видно, что при одном и том же значении m потеря давления в диафрагме больше, чем в сопле. Однако следует отметить, что при равных перепадах давления для одного и того же расхода среды значение m для диафрагмы больше, чем для сопла, поэтому практически потеря давления при использовании диафрагм и сопл приблизительно одинакова.

У сопла Вентури главным образом благодаря наличию на выходе диффузора, способствующего более полному восстановлению потенциальной энергии потока, потеря давления значительно меньше, чем у диафрагмы и сопла. Сопло Вентури рекомендуется приме-

нять в тех случаях, когда в промышленных установках при измерении расхода вещества большие потери давления недопустимы. Потеря давления в коротком сопле Вентури сравнительно небольшая, если выходной диаметр диффузора составляет не менее $0{,}75\,D_{20}$.

14-3. Коэффициенты расхода и поправочные множители к ним

Коэффициенты расхода стандартных сужающих устройств определены экспериментальным путем. Выясним общие причины, вызывающие изменение коэффициента расхода. Для одного и того же сужающего устройства значения коэффициента расхода зависят от плотности измеряемой среды, ее вязкости, скорости потока, геометрических размеров, кроме того, зависят от шероховатости стенок трубы.

В общем виде зависимость коэффициента расхода сужающего устройства от указанных выше величин может быть выражена функциональной зависимостью

$$\alpha = f\left(\frac{vD}{\nu},\ m\right) = f(\mathrm{Re}_D,\ m). \tag{14-3-1}$$

В этой зависимости число Рейнольдса, отнесенное к диаметру трубопровода D, определяется по формуле

$$\mathrm{Re}_D = \frac{vD}{10^3\nu} = \frac{vD\rho}{10^3\eta},$$

где ν — кинематическая вязкость измеряемой среды в рабочих условиях, м²/с; 10^3 — множитель для перевода значения D, выраженного в мм, в значение, выраженное в м; η — динамическая вязкость измеряемой среды в рабочих условиях, Па·с.

Остальные обозначения соответствуют принятым выше.

Практически удобнее определять число Рейнольдса не по скорости, а по расходу измеряемого вещества, т. е.

$$\mathrm{Re}_D = 0{,}354\,\frac{Q_{\text{м}}}{D\nu\rho} = 0{,}354\,\frac{Q_{\text{м}}}{D\eta}; \tag{14-3-2}$$

$$\mathrm{Re}_D = 0{,}354\,\frac{Q_0}{D\nu} = 0{,}354\,\frac{Q_0\rho}{D\eta}; \tag{14-3-3}$$

для расхода сухого газа $Q_{\text{н}}$ в нормальном состоянии

$$\mathrm{Re}_D = 0{,}354\,\frac{Q_{\text{н}}\rho_{\text{н}}}{D\rho\nu} = 0{,}354\,\frac{Q_{\text{н}}\rho_{\text{н}}}{D\eta}; \tag{14-3-4}$$

для расхода сухой части влажного газа в нормальном состоянии

$$\mathrm{Re}_D = 0{,}354\,\frac{Q_{\text{н}}\rho_{\text{н}}}{D\rho_{\text{с.ч}}\nu} = 0{,}354\,\frac{Q_{\text{н}}\rho_{\text{н}}\rho}{D\rho_{\text{с.ч}}\eta}, \tag{14-3-5}$$

где $0{,}354 = \dfrac{1}{10^3\,\dfrac{\pi}{4}\cdot 10^{-6}\cdot 3600}$;

$Q_м$ — массовый расход, кг/ч, согласно формуле

$$Q_м = v\rho \frac{\pi}{4} D^2 \cdot 10^{-6} \cdot 3600;$$

$\rho_н$ — плотность сухого газа в нормальном состоянии, кг/м³;

$\rho_{с.ч}$ — плотность сухой части влажного газа при ее парциальном давлении и температуре t, кг/м³.

Если в потоках двух геометрически подобных сужающих устройств будет иметь место подобие сил трения и инерции, то число Рейнольдса будет одинаковым и коэффициенты расхода для этих сужающих устройств будут также одинаковыми. Для геометрически подобных сужающих устройств значение $m = d^2/D^2$ одинаково и коэффициент расхода зависит только от числа Рейнольдса $\alpha = f(\mathrm{Re}_D)$. Зависимость коэффициента расхода от Re_D проявляется тем сильнее, чем меньше Re_D. С возрастанием числа Рейнольдса эта

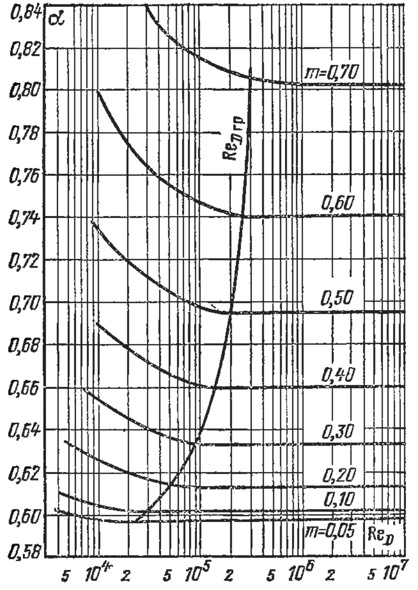


Рис. 14-3-1. Зависимость коэффициента расхода стандартных диафрагм от числа Рейнольдса при различных значениях m.

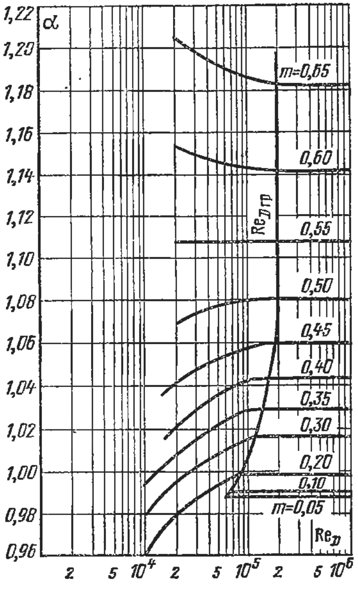


Рис. 14-3-2. Зависимость коэффициента расхода стандартных сопл и сопл Вентури от числа Рейнольдса при различных значениях m.

зависимость сказывается в меньшей степени, а при достаточно больших значениях Re_D (разных для различных сужающих устройств) коэффициенты расхода можно считать постоянными в пределах погрешности их определения (рис. 14-3-1 и 14-3-2).

Значение числа Рейнольдса, начиная от которого коэффициент расхода α для различных значений m при дальнейшем увеличении

Таблица 14-3-1

Граничные значения чисел Рейнольдса для стандартных сужающих устройств в зависимости от m

m	Значения $Re_{D\,гр}$		m	Значения $Re_{D\,гр}$	
	для диафрагм	для сопл и сопл Вентури		для диафрагм	для сопл и сопл Вентури
0,05	23 000	60 000	0,40	134 000	165 000
0,10	30 000	66 000	0,45	158 000	180 000
0,15	42 000	75 000	0,50	185 000	190 000
0,20	57 000	90 000	0,55	210 000	196 000
0,25	73 000	105 000	0,60	240 000	200 000
0,30	90 000	125 000	0,65	270 000	200 000
0,35	110 000	143 000	0,70	300 000	—

Re_D не изменяет своего значения, называют граничным и обозначают через $Re_{D\,гр}$. Значение граничного числа Рейнольдса, как видно из рис. 14-3-1 и 14-3-2, зависит от типа сужающего устройства и значения m. Граничные значения чисел Рейнольдса для стандартных сужающих устройств в зависимости от m приведены в табл. 14-3-1.

Таким образом, для $Re_D > Re_{D\,гр}$ коэффициент расхода α стандартных сужающих устройств остается постоянным и его значение зависит только от m и типа сужающего устройства. Эти коэффициенты, установленные для $Re_D > Re_{D\,гр}$, называют исходными коэффициентами расхода и обозначают через $\alpha_и$. Значения коэффициентов расхода $\alpha_и$ для диафрагм в зависимости от m приведены на рис. 14-3-3, а для сопл и сопл Вентури — на рис. 14-3-4.

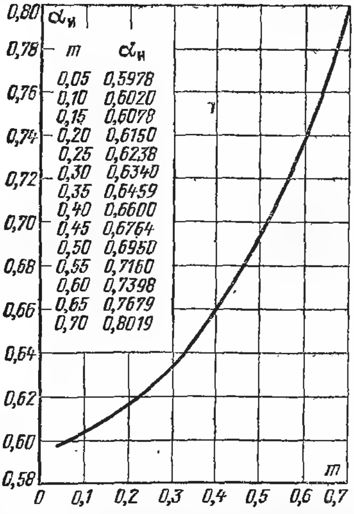
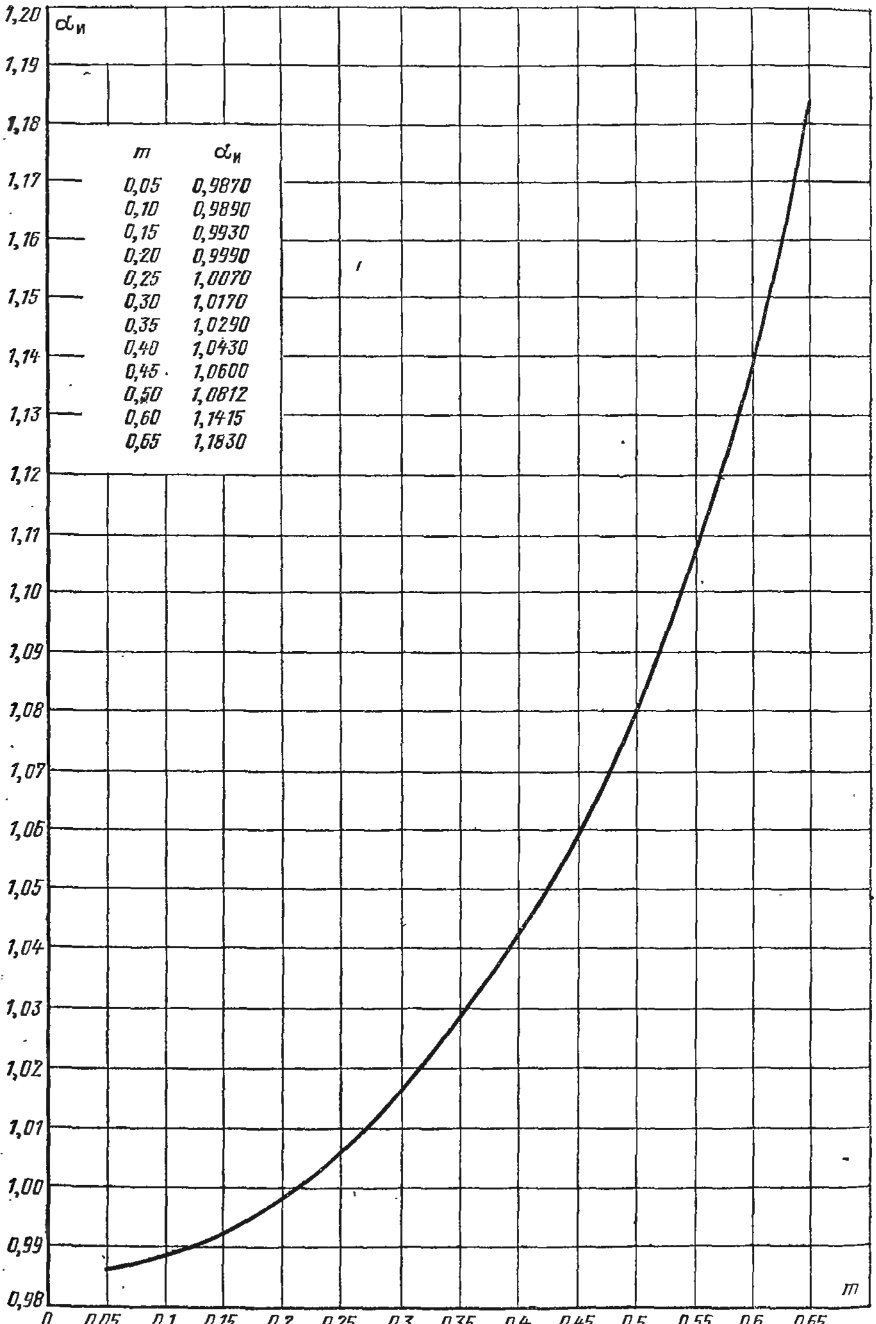


Рис. 14-3-3. Исходный коэффициент расхода стандартных диафрагм в зависимости от m.

Для получения коэффициента расхода α при различных $Re_{D\,мин} < Re_D < Re_{D\,гр}$[1] значение $\alpha_и$ следует умножить на поправочный множитель k_η (рис. 14-3-5 и 14-3-6), учитывающий влияние числа Рейнольдса. Этот множитель называют поправочным множителем на вязкость (основная переменная в уравнении для Re_D). Для промышленных дифманометров-расходомеров, как показано в работе

[1] Для промышленных расходомеров число Re_D, сравниваемое с $Re_{D\,гр}$, подсчитывается для среднего расхода $Q_{ср}$.



m	$\alpha_и$
0,05	0,9870
0,10	0,9890
0,15	0,9930
0,20	0,9990
0,25	1,0070
0,30	1,0170
0,35	1,0290
0,40	1,0430
0,45	1,0600
0,50	1,0812
0,60	1,1415
0,65	1,1830

Рис. 14-3-4. Исходный коэффициент расхода стандартных сопл и сопл Вентури в зависимости от m.

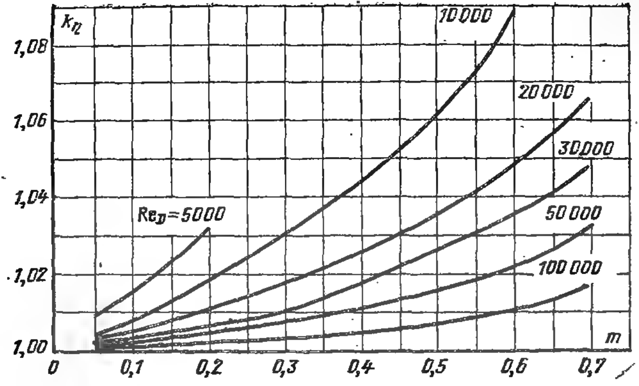


Рис. 14-3-5. Поправочный множитель k_η для диафрагм.

[62] и рекомендуется в Правилах 28-64, поправку на влияние Re_D целесообразно осуществлять не с помощью множителя k_η, а путем введения поправки по расходу ΔQ, которая суммируется алгебраически с показаниями прибора и счетчика (интегратора) за каждый час измерения или учитывается при градуировке. Эта поправка равна:

$$\Delta Q = (k_\eta - 1)\, Q. \quad (14\text{-}3\text{-}6)$$

Учитывая выражения (14-3-3)—(14-3-6), получаем следующие формулы для определения поправки ΔQ:

$$\Delta Q_м = 2{,}82 D\nu\rho k_п = 2{,}82 D\eta k_п; \quad (14\text{-}3\text{-}7)$$

$$\Delta Q_0 = 2{,}82 D\nu k_п = 2{,}82 D\eta k_п \frac{1}{\rho}. \quad (14\text{-}3\text{-}8)$$

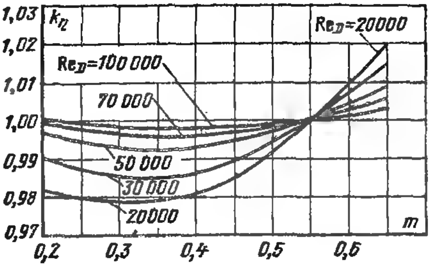


Рис. 14-3-6. Поправочный множитель k_η для сопл и сопл Вентури.

Для сухого газа в нормальном состоянии

$$\Delta Q_н = 2{,}82 \frac{D\nu k_п}{\rho_н} = 2{,}82 \frac{D\eta k_п}{\rho_н}; \quad (14\text{-}3\text{-}9)$$

для сухой части влажного газа в нормальном состоянии

$$\Delta Q_н = 2{,}82 \frac{D\nu \rho_{с.г}\, k_п}{\rho_н} = 2{,}82 \frac{D\eta \rho_{с.г}\, k_п}{\rho_н \rho}, \quad (14\text{-}3\text{-}10)$$

где $k_п = (k_\eta - 1)\, \mathrm{Re}_D$.

Из этих формул видно, что поправка ΔQ является функцией величины $k_п$, которую с погрешностью, не превышающей ±0,3%,

можно считать при заданных m, D и ν (или η) постоянной в широком интервале чисел Рейнольдса. Значения $k_п$ можно брать в зависимости от m по рис. 14-3-7 для диафрагм и по рис. 14-3-8 для сопл и сопл Вентури (Правила 28-64). Здесь приведены также наименьшие числа Рейнольдса $Re_{D\,мин}$, при которых можно пользоваться значениями $k_п$.

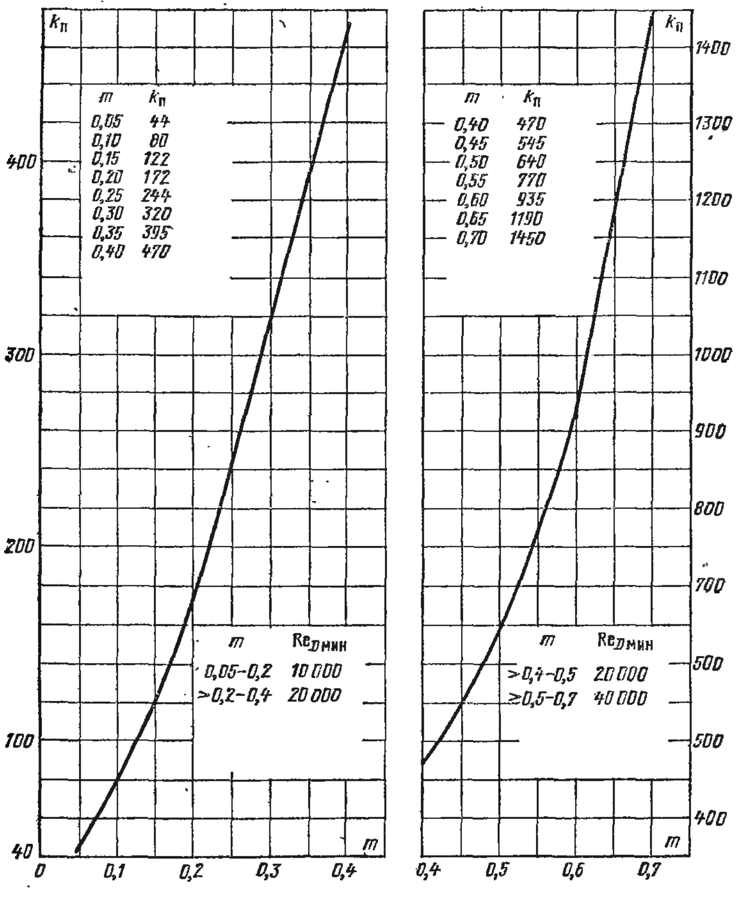


Рис. 14-3-7. Значение $k_п = (k_\eta - 1)\,Re_D$ для диафрагм.

В тех случаях, когда абсолютное значение поправки, выраженное в процентах от верхнего предела шкалы $Q_{в.\,п}$ прибора,

$$|\delta_Q| = \frac{|\Delta Q|}{Q_{в.п}} 100 \qquad (14\text{-}3\text{-}11)$$

не превышает 0,3%, то поправку ΔQ на влияние числа Рейнольдса не вводят. Если $|\delta_Q| > 0,3\%$, то при расчете сужающего устрой-

ства следует изменить m или D так, чтобы имело место неравенство $|\delta_Q| \leqslant 0{,}3\%$. В случае невозможности такого изменения необходимо вводить поправку ΔQ.

Изложенные выше положения о коэффициентах расхода стандартных сужающих устройств справедливы только для трубопроводов с достаточно гладкой внутренней поверхностью. Для диафрагм обязательно также соблюдение остроты входной кромки отверстия. В противном случае принцип подобия нарушается и коэффициент расхода должен быть изменен с учетом поправок на шероховатость трубопровода, а для диафрагм, кроме того, на недостаточную остроту ее кромки.

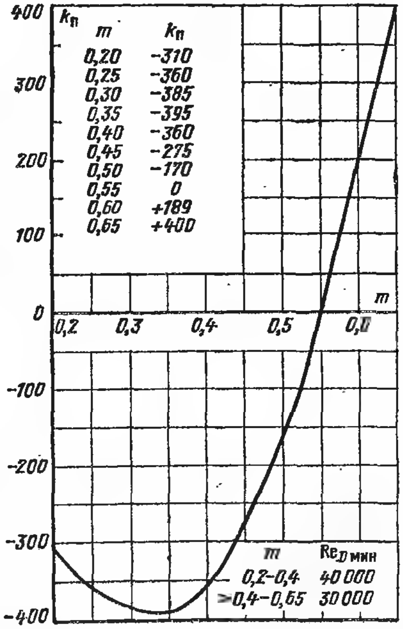


Рис. 14-3-8. Значение $k_п = (k_\eta - 1)\,Re_D$ для сопл и сопл Вентури.

Для труб шероховатых, применяемых в эксплуатации, при тех же условиях коэффициент расхода сужающего устройства отклоняется от исходного его значения. Коэффициент расхода сужающих устройств увеличивается при возрастании относительной шероховатости. Для труб с одинаковой абсолютной шероховатостью влияние шероховатости на коэффициент расхода уменьшается с возрастанием диаметра труб. Поэтому трубы с одинаковой абсолютной шероховатостью при возрастании диаметра все более приближаются по своим свойствам к гладким трубам.

Значения поправочных множителей $k_ш$ к коэффициентам расхода диафрагм, сопл и сопл Вентури, учитывающих влияние шероховатости трубопровода, даны на рис. 14-3-9 для диафрагм, а на рис. 14-3-10 — для сопл и сопл Вентури. Эти значения коэффициентов $k_ш$ соответствуют трубопроводам, внутренняя поверхность которых после длительной эксплуатации покрылась ржавчиной. Если трубопроводы после длительной эксплуатации имеют грубые неровности или наросты на внутренней поверхности, то в этом случае обеспечить надлежащую точность измерения расхода вещества не представляется возможным.

Значения поправочных множителей $k_н$ к исходным коэффициентам расхода диафрагм на неостроту входной кромки определяются по рис. 14-3-11. Этот множитель вводится в тех случаях, когда острота входной кромки диафрагмы не удовлетворяет указанным выше требованиям.

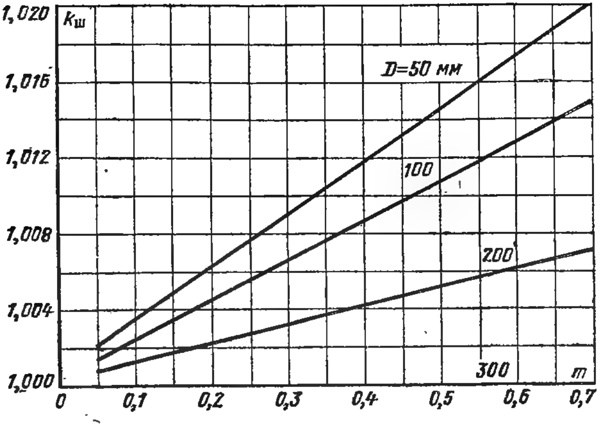


Рис. 14-3-9. Поправочный множитель на шероховатость трубопровода для диафрагм.

Итак, при измерении расхода с помощью переносного двухтрубного или однотрубного дифманометра коэффициент расхода должен определяться по формулам:

для диафрагм

$$\alpha = \alpha_и k_\eta k_ш k_н; \qquad (14\text{-}3\text{-}12)$$

для сопл и сопл Вентури

$$\alpha = \alpha_и k_\eta k_ш. \qquad (14\text{-}3\text{-}13)$$

При измерении расхода промышленными дифманометрами коэффициент расхода следует определять по формулам:

для диафрагм

$$\alpha = \alpha_и k_ш k_н; \qquad (14\text{-}3\text{-}14)$$

для сопл и сопл Вентури

$$\alpha = \alpha_и k_ш. \qquad (14\text{-}3\text{-}15)$$

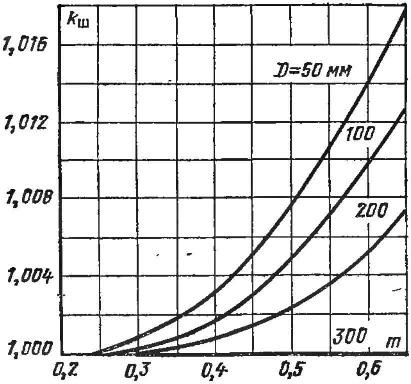


Рис. 14-3-10. Поправочный множитель на шероховатость трубопровода для сопл и сопл Вентури.

Для промышленных расходомеров число Рейнольдса определяют по приведенным выше формулам при среднем расходе измеряемого вещества $Q_{ср}$.

Значения динамической вязкости для воды и водяного пара приведены в табл. П14-3-1 [102], а для наиболее распространенных газов при нормальном давлении в табл. П14-3-2.

Динамическая вязкость газа при давлении p_1 и температуре t_1 может быть приближенно (с погрешностью до 5%) определена по

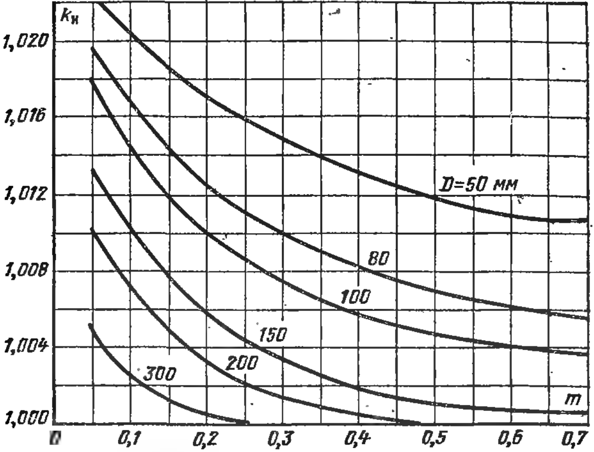


Рис. 14-3-11. Поправочный множитель на неостроту входной кромки диафрагмы.

формуле [61]:

$$\eta = C_\eta \eta_1, \tag{14-3-16}$$

где η_1 — динамическая вязкость при нормальном давлении и температуре t_1; C_η — множитель, зависящий от приведенной температуры и приведенного давления (рис. П14-3-1).

Под приведенной температурой понимается отношение абсолютной рабочей температуры газа T_1 к его абсолютной критической температуре $T_{кр}$:

$$T_{пр} = \frac{T_1}{T_{кр}}. \tag{14-3-17}$$

Под приведенным давлением понимается отношение абсолютного рабочего давления газа p_1 к его абсолютному критическому давлению:

$$p_{пр} = \frac{p_1}{p_{кр}}. \tag{14-3-18}$$

Критические значения температуры и давления для наиболее распространенных газов даны в табл. П14-3-2.

Кинематическая вязкость газовых смесей (горючих газов), содержащих кислород, водород, азот, окись углерода, углекислый газ, метан и тяжелые углеводороды (или только часть этих компонентов), может быть определена по формуле [61]:

$$\nu_{20} = \frac{15,40 \cdot 10^{-4}}{100 + (CO_2 + C_mH_n) - 0,857H_2}, \tag{14-3-19}$$

где ν_{20} — кинематическая вязкость газовой смеси при температуре 20°C и давлении 1,0332 кгс/см²; $CO_2 + C_mH_n$ — суммарное содержание в смеси углекислого

газа и тяжелых углеводородов (кроме метана) в процентах по объему; H_2 — содержание водорода в смеси в процентах по объему.

Для указанных газовых смесей кинематическая вязкость ν_t при любой температуре t в интервале от —10 до 40°С и давлении 1,0332 кгс/см² подсчитывается по формуле

$$\nu_t = \nu_{20}\,[1 + 0{,}006\,(t - 20)]. \qquad (14\text{-}3\text{-}20)$$

14-4. Поправочный множитель на расширение измеряемой среды

Поправочный множитель ε на расширение измеряемой среды (газа или пара) вводится вследствие того, что плотность газа или пара изменяется при прохождении через сужающее устройство. Основным параметром, определяющим значение поправочного множителя ε, является отношение $\Delta p/p_1$ или p_2/p_1, характеризующее степень изменения плотности ρ среды при прохождении через сужающее устройство. Чем больше отношение $\Delta p/p_1$ или чем меньше p_2/p_1, тем значительнее изменение ρ и тем больше ε отличается от единицы. При малых значениях $\Delta p/p_1$ поправочный множитель ε близок к единице. При одном и том же значении $\Delta p/p_1$ для диафрагм поправочный множитель всегда больше, чем для сопл и сопл Вентури. Это объясняется тем, что у диафрагм имеет место радиальное расширение струи, приводящее к увеличению площади ее суженной части, вследствие чего у диафрагм $\mu_к > \mu$.

Как видно из формулы (14-1-21), при одном и том же значении $\Delta p/p_1$ или p_2/p_1 множитель ε зависит от k, $\mu_к$ и $\alpha_к/\alpha$. Кроме того, значение поправочного множителя зависит от модуля m и типа сужающего устройства.

Для диафрагм нельзя определить поправочный множитель ε аналитически по формуле (14-1-21), так как неизвестны значения $\mu_к$ и отношение $\alpha_к/\alpha$. Поэтому, как отмечалось выше, поправочный множитель для стандартных диафрагм определяется экспериментально.

Поправочный множитель на расширение измеряемой среды в общем случае зависит от величин

$$\varepsilon = f\left(\frac{\Delta p}{p_1},\ m,\ k\right) \quad \text{или} \quad \varepsilon = f\left[\left(1 - \frac{\Delta p}{p_1}\right)^{1/k},\ m\right].$$

Зависимость поправочного множителя ε для стандартных диафрагм от основного параметра $\Delta p/p_1$, значения m и показателя адиабаты k может быть выражена эмпирическим уравнением [61]:

$$\varepsilon = 1 - (0{,}3707 + 0{,}3184 m^2)\left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1}\right)^{1/k}\right]^{0{,}935}. \qquad (14\text{-}4\text{-}1)$$

Для стандартных сопл и сопл Вентури поправочный множитель ε может быть подсчитан аналитически. Так как для сопл и сопл Вентури $\mu_к = \mu = 1$ и $\alpha_к/\alpha = 1$, формула (14-1-21) после несложных преобразований принимает вид:

$$\varepsilon = \left[\left(1 - \frac{\Delta p}{p_1}\right)^{2/k} \frac{k}{k-1}\,\frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{\frac{\Delta p}{p_1}}\,\frac{1 - m^2}{1 - m^2\left(1 - \frac{\Delta p}{p_1}\right)^{2/k}}\right]^{1/2}. \qquad (14\text{-}4\text{-}2)$$

Числовые значения поправочного множителя ε для диафрагм, сопл и сопл Вентури могут быть определены в зависимости от $\Delta p/p_1$, k и m также по номограммам (рис. П14-4-1) — (П14-4-3), приводимым в Правилах 28-64. Пунктирные линии со стрелками на номограммах показывают порядок нахождения ε.

Пунктирные линии, проведенные на номограммах, показывают так же порядок нахождения ε в зависимости от $\left(1-\frac{\Delta p}{p_1}\right)^{1/k}$ и m (рис. П14-4-1 и П14-4-2) или B (табл. П14-4-1) и m (рис. П14-4-3).

Поправочный множитель ε, найденный по номограммам, действителен только для определенных значений $\Delta p/p_1$. При измерении же расхода среды с помощью промышленного расходомера, отградуированного в единицах расхода, отношение $\Delta p/p_1$ будет изменяться в определенных пределах. Поэтому при расчете сужающего устройства для работы в комплекте с промышленным дифманометром пользуются средним значением $\varepsilon_{ср}$. Значение $\varepsilon_{ср}$ определяется по номограммам в зависимости от $\Delta p_{ср}/p_1$. При этом отношение $\Delta p_{ср}/p_1$ принимается равным:

$$\frac{\Delta p_{ср}}{p_1}=\frac{\Delta p}{10^4 p_1}\left(\frac{Q_{ср}}{Q_{в.п}}\right)^2, \tag{14-4-3}$$

где $\Delta p_{ср}$ — средний перепад давления, который соответствует ожидаемому среднему расходу $Q_{ср}$, кгс/м²; Δp — наибольший перепад давления, вычисляемый по предельному номинальному перепаду давления дифманометра ($\Delta p_н$), кгс/м²; $Q_{в.п}$ — верхний предел измерения дифманометра.

Однако при таком способе определения поправочного множителя на расширение измеряемой среды для всех значений $Q \neq Q_{ср}$ возникает дополнительная погрешность, обусловленная отклонением действительного значения ε от его расчетного среднего значения. Для уменьшения указанной дополнительной погрешности при измерении расхода газа или пара, особенно с помощью диафрагм, необходимо, чтобы отношение $\Delta p_{ср}/p_1$ было наименьшим.

Известно, что показатель адиабаты k реального газа зависит от температуры и давления. При давлениях, близких к атмосферному, показатель адиабаты с достаточной точностью может быть определен как отношение $k = c_p/c_v$, где c_p, c_v — теплоемкость газа соответственно при постоянном давлении и объеме.

Значения k некоторых газов при различных температурах и давлении, близком к атмосферному, даны в табл. П14-3-2, а для перегретого водяного пара — на рис. П14-4-4.

Показатель адиабаты $k_{см}$ смеси газов, если отсутствуют экспериментальные данные, может быть определен по формуле

$$k_{см}=v_1k_1+v_2k_2+\ldots+v_lk_l, \tag{14-4-4}$$

где v_1; v_2; ...; v_l — объемные доли компонентов в газовой смеси (в долях единицы); k_1; k_2; ...; k_l — показатели адиабаты этих компонентов.

14-5. Определение плотности измеряемой среды

Плотность среды, протекающей по трубопроводу, должна определяться с максимально возможной точностью из табличных данных, путем непосредственного измерения или расчетом в зависимости от давления и температуры среды перед сужающим устройством.

Термоприемник для измерения температуры среды рекомендуется устанавливать в трубопроводе перед сужающим устройством так, чтобы он не вызывал нарушения потока. Для этого термоприемник с диаметром $d_т$ должен устанавливаться перед сужающим устройством на следующем расстоянии l_1 до входного торца сужающего устройства:

$$l_1 \geqslant 5D_{20} \text{ при } d_т \leqslant 0{,}03D_{20};$$

$$l_1 \geqslant 20D_{20} \text{ при } 0{,}03D_{20} < d_т \leqslant 0{,}13D_{20}.$$

Если имеется полная уверенность в том, что температура среды при прохождении ее через сужающее устройство практически не изменяется, то можно термоприемник устанавливать за сужающим устройством на расстоянии $l_2 = (8 \div 10)\, D_{20}$.

Избыточное давление $p_{и}$ среды согласно Правилам 28-64 необходимо измерять непосредственно у входного торца сужающего устройства через отдельное специальное отверстие, выполненное в корпусе камеры (рис. 14-2-3), в обойме (рис. 14-2-2) или вблизи фланца (рис. 14-2-4). Это отверстие не должно использоваться для измерения перепада давления. Отверстие должно выполняться диаметром 6—12 мм, но не более $0{,}08\, D_{20}$. Внутренняя кромка должна быть выполнена как указано выше.

Однако, в большинстве практических случаев избыточное давление среды, измеренное манометром перед сужающим устройством на расстоянии $l_1 = (5 \div 10)\, D_{20}$, можно принять равным избыточному давлению среды $p_и$, измеренному у входного торца сужающего устройства.

Абсолютное давление p_1 измеряемой среды определяется как сумма избыточного $p_и$ и барометрического $p_б$ давлений. Для жидкостей барометрическое давление принимается равным 1 кгс/см². Для газов и водяного пара барометрическое давление допускается принимать равным 1 кгс/см², если абсолютное значение разности между 1 и $p_б$ не превышает $0{,}001 p_и$.

Значения плотности воды и перегретого водяного пара в зависимости от температуры и давления приведены в табл. П14-5-1 и П14-5-2[1].

Если плотность ρ_{20} жидкости дана в таблицах при температуре t_{20}, отличной от рабочей температуры t_1, то значение плотности ρ_t при температуре t_1 определяется по формуле

$$\rho_t = \rho_{20}\,[1 - \beta\,(t - t_{20})], \qquad (14\text{-}5\text{-}1)$$

[1] Таблицы П14-5-1 и П14-5-2 составлены по [63].

где β — средний коэффициент объемного расширения жидкости в интервале температур от t_{20} до t, K^{-1}.

Значения плотности для наиболее распространенных газов в нормальном состоянии приведены в табл. П14-3-2. За нормальное состояние газа, как отмечалось выше, принимается такое состояние, при котором температура газа $t_н = 20°C$, давление $p_н = 1{,}0332$ кгс/см² (101 325 Па) и относительная влажность $\varphi = 0$.

Если известна плотность $\rho_н$ сухого газа в нормальном состоянии, то его плотность в рабочем состоянии при p_1 и T_1 может быть определена по формуле

$$\rho = \frac{\rho_н p_1 T_н}{T_1 p_н K}, \qquad (14\text{-}5\text{-}2)$$

где K — коэффициент сжимаемости газа, характеризующий отклонение данного газа от законов идеального газа.

Коэффициент K введен в формулу (14-5-2) потому, что действительная плотность ρ газа в рабочем состоянии при p_1 и T_1 отличается от теоретического значения $\rho_{т.з}$, подсчитанного по законам идеального газа (исходя из плотности при температуре 0°C и давлении 1,0332 кгс/см²). Коэффициент сжимаемости $K = \frac{\rho_{т.з}}{\rho}$. Значения K для некоторых распространенных газов приведены в [61].

Коэффициент сжимаемости $K_{см}$ газовой смеси может быть найден приближенно по формуле

$$K_{см} = v_1 K_1 + v_2 K_2 + \ldots + v_i K_i, \qquad (14\text{-}5\text{-}3)$$

где v_1; ...; v_i — объемная доля данного компонента в смеси; K_i — коэффициент сжимаемости компонента при давлении смеси.

Значения коэффициентов K и $K_{см}$ в зависимости от приведенной температуры (14-3-17) и приведенного давления (14-3-18) даны в [61].

Критические температура $T_{кр.см}$ и давление $p_{кр.см}$ смеси газов определяются по формулам

$$T_{кр.см} = v_1 T_{кр1} + v_2 T_{кр2} + \ldots + v_i T_{кр\,i}; \qquad (14\text{-}5\text{-}4)$$

$$p_{кр.см} = v_1 p_{кр1} + v_2 p_{кр2} + \ldots + v_i p_{кр\,i}, \qquad (14\text{-}5\text{-}5)$$

где $T_{кр i}$ и $p_{кр i}$ — соответственно критические температура и давление данного компонента в смеси (табл. П14-3-2).

Плотность смеси сухих газов может быть определена по формуле

$$\rho = v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2 + \ldots + v_i \rho_i, \qquad (14\text{-}5\text{-}6)$$

где v_i — объемная доля данного компонента в смеси; ρ_i — плотность компонента при температуре и давлении смеси, кг/м³.

Плотность ρ влажного газа в рабочем состоянии при p_1 и T_1 определяется по формулам

$$\rho = \rho_{с.г} + \rho_{в.п} = \rho_{с.г} + \varphi \rho_{н.п}; \qquad (14\text{-}5\text{-}7)$$

$$\rho_{с.г} = \rho_н \frac{(p_1 - \varphi p_{н.п}) T_н}{T_1 p_н K}, \qquad (14\text{-}5\text{-}8)$$

где $\rho_{с.г}$ — плотность сухой части газа во влажном газе при ее парциальном давлении, равном $p_1 - \varphi p_{н.п}$, и температуре T_1, кг/м³; $\rho_{в.п}$ — плотность водяного пара в газе при его парциальном давлении, равном $\varphi p_{н.п}$, и температуре T_1, кг/м³; φ — относительная влажность газа, в долях единицы, т. е. отношение плотности водяного пара во влажном газе при T_1 и p_1 к максимально возможной плотности

пара при той же температуре и давлении; $\rho_{н.п}$ — плотность насыщенного водяного пара при температуре T_1, кгс/м³ [61]; $p_{н.п}$ — давление насыщенного водяного пара при температуре T_1, кгс/см² [61].

Если рабочая температура T_1 газа превышает температуру насыщения $T_{нас}$ водяного пара, то $\rho_{н.п}$ равно плотности перегретого водяного пара при T_1 и p_1 (табл. П14-5-2), а $p_{н.п} = p_1$.

Если относительная влажность φ' газа известна при параметрах p' и T', отличающихся от рабочих параметров p_1 и T_1, то относительная влажность φ газа в рабочем состоянии находится по формуле

$$\varphi = \varphi' \frac{p_1 T' \rho'_{н.п}}{p' T_1 \rho_{н.п}}; \qquad (14\text{-}5\text{-}9)$$

здесь плотности $\rho_{н.п}$ и $\rho'_{н.п}$ газа определяются, как указано выше.

Если при подсчете по формуле (14-5-10) получается значение $\varphi > 1$, то в рабочем состоянии газ будет насыщен водяным паром и при этом часть его сконденсируется. В данном случае за действительное значение следует принять $\varphi = 1$.

14-6. Основные расчетные формулы расхода

Уравнения расхода (14-1-19) и (14-1-20) в кг/ч и м³/ч соответственно могут быть представлены в виде

$$Q_м = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\rho \Delta p}; \qquad (14\text{-}6\text{-}1)$$

$$Q_о = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}, \qquad (14\text{-}6\text{-}2)$$

где $1{,}252 \cdot 10^{-2} = 3600 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4} \sqrt{2 \cdot 9{,}81}$; здесь 9,81 — множитель для перевода значения Δp, выраженного в кгс/м², в значение, выраженное в Па; α — коэффициент расхода сужающего устройства; ε — поправочный множитель на расширение измеряемой среды; d — диаметр отверстия сужающего устройства при температуре измеряемой среды, мм, согласно формуле $F_0 = 10^{-6} \frac{\pi}{4} d$ (F_0 выражено в м²); ρ — плотность измеряемой среды в рабочих условиях при p_1 и t_1; Δp — перепад давления в сужающем устройстве, кгс/м².

Диаметр d_{20} отверстия сужающего устройства и внутренний диаметр D_{20} трубопровода обычно измеряют при температуре 20°C или приводят к ней. Значения диаметров d и D, соответствующие рабочей температуре t_1 среды, протекающей в трубопроводе, могут быть определены по формулам

$$d = d_{20} [1 + \alpha_{м.с} (t - 20)] = d_{20} k'_t; \qquad (14\text{-}6\text{-}3)$$

$$D = D_{20} [1 + \alpha_{м.т} (t - 20)] = D_{20} k''_t, \qquad (14\text{-}6\text{-}4)$$

где $\alpha_{м.с}$ и $\alpha_{м.т}$ — средний коэффициент линейного расширения материала соответственно сужающего устройства и трубопровода в интервале от 20°C до t, К⁻¹.

Значения поправочного множителя k_t для некоторых металлов приведены на рис. П14-6-1. Если температура t_1 измеряемой среды находится в интервале от −20 до +60°C, то можно принимать $k'_t = k''_t = 1$; $d = d_{20}$; $D = D_{20}$.

При измерении наибольшего перепада давления Δp в сужающем устройстве дифманометрами, в которых мерой значения перепада давления является разность уровней рабочей жидкости, необходимо учитывать не только плотность последней, но также и плотность среды, находящейся над рабочей жидкостью. При использовании колокольных с пружинным уравновешиванием, кольцевых с замкнутой кольцевой трубкой, мембранных и сильфонных дифманометров наибольший перепад давления Δp в сужающем устройстве принимают равным их предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_н$.

Для поплавковых дифманометров, заполненных ртутью, над которой находится среда плотностью $\rho_в' > 14$ кгс/м³, или маслом, над которым находится газ плотностью $\rho_в' > 0{,}9$ кг/м³, после подстановки выражения (12-4-16) в уравнения (14-6-1) и (14-6-2), получим для определения $Q_м$, кг/ч и Q_0, м³/ч:

$$Q_м = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\rho \Delta p_н \left(1 - \frac{\rho_в'}{\rho}\right)}, \qquad (14\text{-}6\text{-}5)$$

$$Q_0 = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p_н}{\rho} \left(1 - \frac{\rho_в'}{\rho}\right)}, \qquad (14\text{-}6\text{-}6)$$

где $\Delta p_н$ в кгс/м².

Для колокольных, кольцевых, мембранных и сильфонных дифманометров, а также для поплавковых, заполненных ртутью, над которой находится газ плотностью $\rho_в' \leqslant 14$ кг/м³, или маслом, над которым находится газ плотностью $\rho_в' \leqslant$ $\leqslant 0{,}9$ кг/м³ (см. (12-4-18)], применяют уравнения расхода (14-6-1) и (14-6-2).

Если предельный номинальный перепад давления $\Delta p_н$ дифманометра выражен в кгс/см², то в приведенные основные расчетные формулы расхода следует подставлять значение $\Delta p_н$, умноженное на коэффициент 10^4.

Приведение расхода газа к нормальному состоянию. При определении расхода сухого газа уравнение (14-6-1) дает массовый расход газа. Для получения объемного расхода газа в нормальном состоянии необходимо массовый расход сухого газа $Q_м$, вычисленный по уравнению (14-6-1), разделить на $\rho_н$. Разделив уравнение (14-6-1) на $\rho_н$ и заменив, используя формулу (14-5-2) $\rho/\rho_н$, получим уравнение для определения расхода сухого газа в нормальном состоянии:

$$Q_н = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_н}} \sqrt{\frac{p_1 T_н}{T_1 p_н K}}. \qquad (14\text{-}6\text{-}7)$$

Умножая правую часть этого уравнения на $\sqrt{\frac{\rho}{\rho}}$ и учитывая формулу (14-5-2), получаем:

$$Q_н = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho} \frac{p_1 T_н}{T_1 p_н K}}, \qquad (14\text{-}6\text{-}8)$$

или

$$Q_н = Q_0 \frac{p_1 T_н}{T_1 p_н K}. \qquad (14\text{-}6\text{-}9)$$

Эта формула позволяет привести расход Q_0 сухого газа в рабочем состоянии при p_1 и T_1 к расходу $Q_н$ в нормальном состоянии.

При определении расхода влажного газа уравнение (14-6-1) выражает общий расход газа $Q_м$, включая и содержащуюся в нем влагу. Для определения массового расхода сухого газа $Q_{м.с}$ за вычетом влаги необходимо массовый расход $Q_м$, вычисленный по формуле (14-6-1), умножить на $\rho_{с.г}/\rho$:

$$Q_{м.\,с} = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}\, \rho_{с.\,г}. \qquad (14\text{-}6\text{-}10)$$

Для получения объемного расхода газа в нормальном состоянии необходимо массовый расход сухого газа $Q_{м.с}$, содержащегося во влажном газе, разделить на $\rho_н$, т. е. на плотность газа в нормальном состоянии. Разделив на $\rho_н$ уравнение (14-6-10), получим:

$$Q_н = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho} \frac{\rho_{с.\,г}}{\rho_н}}. \qquad (14\text{-}6\text{-}11)$$

Заменяя здесь $\rho_{с.г}/\rho_н$ по формуле (14-5-8), получаем:

$$Q_н = 1{,}252 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho} \frac{(p_1 - \varphi p_{н.\,п})\, T_н}{T_1 p_н K}} \qquad (14\text{-}6\text{-}12)$$

или

$$Q_н = Q_{о.\,в} \frac{(p_1 - \varphi p_{н.\,п})\, T_н}{T_1 p_н K}, \qquad (14\text{-}6\text{-}13)$$

где $Q_{о.в}$ — объемный расход влажного газа в рабочем состоянии при T_1 и p_1, м^3/ч.

14-7. Методические указания по измерению расхода жидкостей, газов и пара расходомерами с сужающим устройством

Общие указания. Стандартные сужающие устройства могут применяться в комплекте с дифманометрами для измерения расхода и количества жидкостей, газов и пара в круглых горизонтальных, вертикальных и наклонных трубопроводах диаметром не менее 50 мм на основании расчета без индивидуальной градуировки при соблюдении требований Правил 28-64 [61].

Точность измерения расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве зависит не только от типа выбранного сужающего устройства и дифманометра, а в равной мере и от соблюдения ряда условий, рассматриваемых ниже.

Необходимо, чтобы измеряемое вещество заполняло все поперечное сечение трубопровода перед сужающим устройством и за ним. Пар должен быть перегретым. Поток в трубопроводе является или может быть практически принят установившимся. Фазовое состояние вещества не изменяется при прохождении через сужающее устройство (например, растворенные в жидкости газы не выделяются, водяной пар остается перегретым, жидкость не испаряется).

Конденсат и пыль, выделяющиеся при измерении расхода газа или пара, а также газы или осадки, выделяющиеся при измерении расхода жидкости, не скапливаются в трубопроводе вблизи сужающего устройства.

При измерении расхода вещества, вызывающего отложения на сужающем устройстве, обеспечена возможность периодической

очистки (продувки, промывки) сужающего устройства. Применение стандартных сужающих устройств для измерения расхода коллоидальных растворов допустимо в тех случаях, когда раствор по степени дисперсности и физическим свойствам мало отличается от однофазной жидкости.

При измерении расхода агрессивных жидкостей или газов, а также нефтепродуктов и активных сред необходимо дифманометры устанавливать со специальными разделительными сосудами. Для измерения расхода активных сред необходимо применять разделительные сосуды с металлическими разделительными перегородками.

Место установки дифманометров должно обеспечивать удобство обслуживания и наблюдения за их работой; дифманометры должны быть установлены по отвесу или уровню на прочных основаниях в местах, которые не подвергаются вибрациям и ударным сотрясениям (при наличии вибраций необходимо применять амортизирующие приспособления). Вторичные приборы дифманометров, как правило, устанавливаются на щитах.

Если измерение расхода ведется в условиях, при которых параметры измеряемой среды отличаются от параметров, принятых для расчета сужающего устройства и шкалы расходомера, то для получения действительного значения расхода необходимо в показания прибора ввести соответствующую поправку или по показаниям прибора произвести пересчет. Рассмотрим общий случай, когда плотность измеряемой среды отклоняется от принятого значения при расчете сужающего устройства и шкалы расходомера. В этом случае действительный расход $Q_{м.д}$ ($Q_{о.д}$) определяется по формулам [1]

$$Q_{м.д} = Q_м \sqrt{\frac{\rho_д}{\rho}}; \tag{14-7-1}$$

$$Q_{о.д} = Q_о \sqrt{\frac{\rho}{\rho_д}}, \tag{14-7-2}$$

где ρ и $\rho_д$ — плотность измеряемой среды соответственно для расчетных и действительных условий.

В эксплуатации расходомеры необходимо периодически проверять, а также производить осмотр сужающего устройства. Рекомендуется периодически проверять герметичность вентилей, штуцеров, уплотнительных муфт и в целом соединенной линии, так как утечка через неплотность может сильно исказить показания прибора. Для нормальной эксплуатации соединительных линий необходимо вблизи дифманометра устанавливать вентили для продувки линий.

Установка сужающих устройств. При установке сужающих устройств необходимо соблюдать ряд указанных ниже условий, не-

[1] Формулы для пересчета показаний дифманометра для других условий приведены в [61].

соблюдение которых может привести к недопустимым погрешностям измерений. Место установки сужающего устройства и способы его крепления должны обеспечивать возможность периодического осмотра. При выборе места установки сужающего устройства необходимо, чтобы участки трубопровода до и после его были прямыми и цилиндрическими с круглыми сечениями. Длина этих участков должна быть такой, чтобы различные искажения потока, происходящие от его прохождения через закругления, колена, вентили и т. п., смогли вполне сгладиться. При этом необходимо иметь в виду, что более существенное значение имеют искажения потока перед сужающим устройством и значительно меньшее — за ним.

Действительный внутренний диаметр участка трубопровода перед сужающим устройством необходимо определять как среднее арифметическое значение результатов измерений в двух поперечных сечениях. Первое сечение берется непосредственно у входа в сужающее устройство, а второе — на расстоянии $2D_{20}$ от него. Измерения должны производиться в каждом из этих сечений не менее чем в четырех диаметральных направлениях. Результаты отдельных измерений не должны отличаться от среднего значения более чем на 0,3%. Внутренний диаметр участка трубопровода на длине $2D_{20}$ за сужающим устройством может отличаться от внутреннего диаметра участка трубопровода перед сужающим устройством не более чем на $\pm 2\%$. Измеренный действительный внутренний диаметр трубопровода должен быть равен диаметру D_{20}, принятому для расчета сужающего устройства и шкалы расходомера.

Необходимые наименьшие длины l_1 прямых участков трубопровода постоянного диаметра перед сужающим устройством для наиболее часто встречающихся случаев их установки приведены на рис. 14-7-1.

Задвижки и вентили, установленные до сужающего устройства, особенно открытые не полностью, вызывают значительное возмущение потока. Поэтому сужающее устройство рекомендуется устанавливать до регулировочной задвижки или вентиля. Если они будут находиться перед сужающим устройством, то измерение можно считать надежным при условии, что длина участка l_1 составляет не менее 100 D_{20}.

Необходимые наименьшие длины l_2 прямого участка трубопровода за сужающим устройством приведены на рис. 14-7-2. Для диафрагм и сопл длина l_2 отсчитывается от входного их торца, а для сопла Вентури — от его выходного торца.

Внутренняя поверхность трубопровода перед и за сужающим устройством не должна иметь каких-либо уступов, а также заметных невооруженным глазом наростов и неровностей от заклепок, сварных швов и т. п.

При установке сужающих устройств во фланцевом соединении трубопровода необходимо обращать особое внимание на плотность соединений, а также следить за правильной установкой сужающих устройств по отношению к направлению потока. При этом правиль-

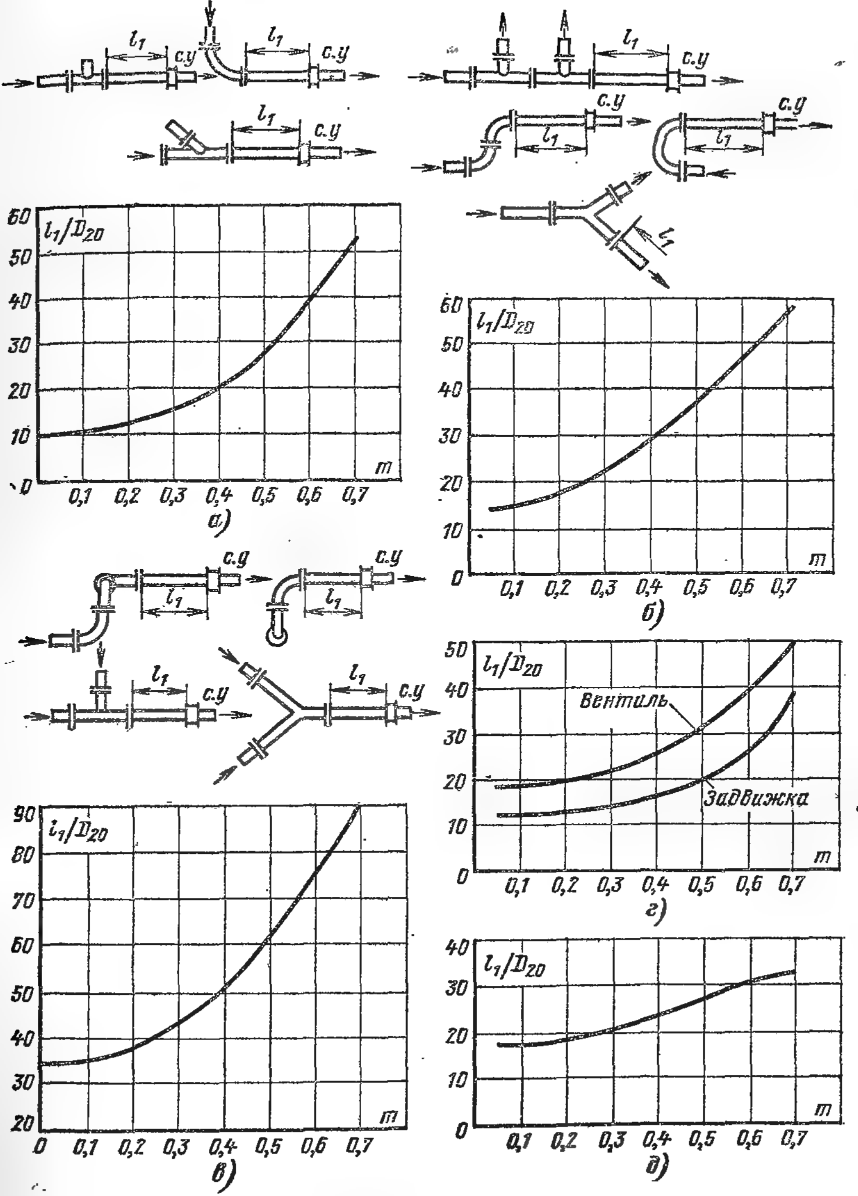


Рис. 14-7-1. Необходимые наименьшие длины прямых участков трубопровода перед сужающим устройством.

а — колено или тройник; *б* — группа колен в одной плоскости или разветвляющийся поток; *в* — группа колен в разных плоскостях или смешивающиеся потоки; *г* — полностью открытые вентиль и задвижка; *д* — сходящийся или расходящийся конус (конусность 1 : 3).

ность установки должна быть проверена по стрелке, выбитой на внешней поверхности камеры. Уплотнительные прокладки между сужающим устройством и фланцами не должны выступать во внутреннюю полость трубопровода. Смещение оси отверстия сужающего устройства относительно оси трубопровода не должно превышать допускаемых значений, указываемых в [61].

Для уменьшения необходимых длин прямых участков трубопровода в случаях, если имеется неравномерное движение потока, применяют различного рода струевыпрямители. Однако следует указать, что установка их целесообразна только после местных сопротивлений, создающих вихревой поток (например, группа колен в разных плоскостях). Из числа применяемых струевыпрямителей наибольшее внимание заслуживают трубчатый и пластинчатый струевыпрямители [59].

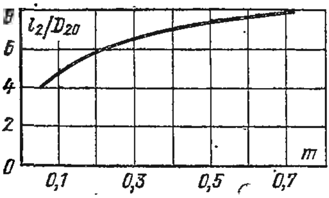


Рис. 14-7-2. Необходимые наименьшие длины прямых участков трубопровода за сужающим устройством.

Длина прямого участка трубопровода до или после сужающего устройства может быть сокращена вдвое по сравнению с длинами l_1 и l_2, указанными на рис. 14-7-1, 14-7-2. При этом необходимо иметь в виду, что от указанного сокращения длины прямого участка трубопровода возникает дополнительная погрешность измерения расхода, равная 0,5%. В этом случае рекомендуется применять сужающие устройства с кольцевыми камерами для отбора давлений.

Если перепад давлений в сужающем устройстве измеряют через кольцевые камеры, то длина l_1 прямого участка трубопровода может быть сокращена в три раза по сравнению с длинами, указанными на рис. 14-7-1. В этом случае будет возникать дополнительная погрешность измерения расхода, равная 1%.

Следует указать, что сокращенная длина перед сужающим устройством в любом случае не должна быть менее $6D_{20}$.

Как будет показано ниже, дополнительная погрешность от сокращения длины прямого участка трубопровода учитывается при определении погрешности измерения расхода.

Схемы соединительных линий при измерении расхода жидкостей, газов и пара. Ниже будут даны общие методические указания по построению схем соединительных линий и их прокладке при измерении расхода жидкостей, газов и пара расходомерами с сужающим устройством. Кроме того, будут рассмотрены наиболее распространенные варианты взаимного расположения сужающего устройства, вспомогательных приспособлений и дифманометров при измерении расхода указанных сред.

Длину соединительных линий необходимо выполнять такой, чтобы температура вещества, поступающего в дифманометр, была равна температуре окружающего воздуха. При этом желательно,

чтобы длина линии не превышала 15 м. Допускается наибольшая длина соединительных линий до 50 м. Необходимо иметь в виду, что динамическая погрешность, которую может вносить дифманометр при измерении нестационарного расхода вещества, в значительной мере зависит от длины и диаметра соединительных линий [5, 59]. В каждом отдельном случае длина соединительных линий должна выполняться также с учетом рекомендаций, даваемых в заводской инструкции по монтажу и эксплуатации дифманометров и сужающих устройств.

Внутренний диаметр соединительных линий должен быть не менее 8 мм, а внутренний диаметр труб, соединяющих кольцевые камеры или отдельные отверстия сужающего устройства с уравни-

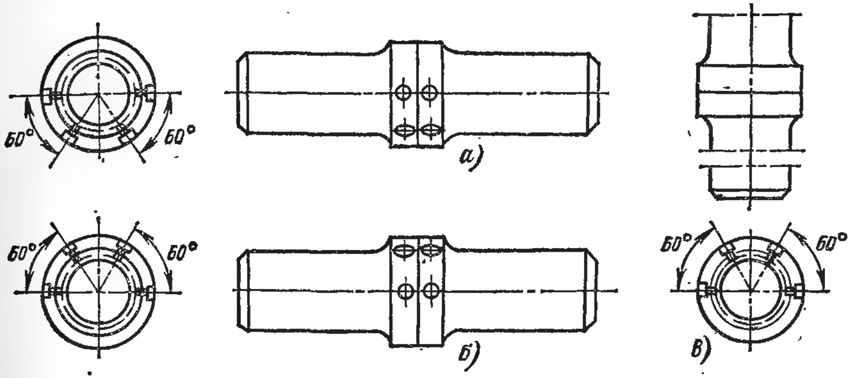


Рис. 14-7-3. Расположение четырех пар отверстий для отборов давлений в кольцевых камерах сужающего устройства в патрубках со сварным соединением при измерении расхода воды (*а* и *в*) и пара (*б* и *в*).

тельными или разделительными сосудами, — не менее 12 мм. При измерении расхода вещества, находящегося под низким давлением, для выполнения соединительных линий следует применять трубы с большим диаметром. Соединительные линии должны прокладываться по кратчайшему расстоянию вертикально или с уклоном к горизонтали не менее 1 : 10. Изгибы труб линий должны выполняться плавными. Соединительные линии должны быть герметичными. Кроме того, соединительные линии должны быть защищены от действия внешних источников тепла или холода.

Вентили, устанавливаемые в соединительных линиях, должны быть прямоточными, а площадь сечения проходного их отверстия должна быть не менее площади сечения труб. Установка вентилей в трубах, соединяющих уравнительные сосуды с кольцевыми камерами или отдельными отверстиями сужающего устройства, не допускается.

К одному сужающему устройству может быть подключено несколько дифманометров. При этом каждый дифманометр должен иметь независимые друг от друга соединительные линии, присоеди-

няемые к отдельным отверстиям в кольцевых камерах сужающего устройства. В качестве примера на рис. 14-7-3 показано расположение четырех пар отверстий в кольцевых камерах сужающего устройства для отбора давлений при измерении расхода воды и пара в горизонтальном и вертикальном трубопроводах.

При измерении расхода жидкости дифманометр рекомендуется устанавливать ниже сужающего устройства (рис. 14-7-4,*а*). Такой

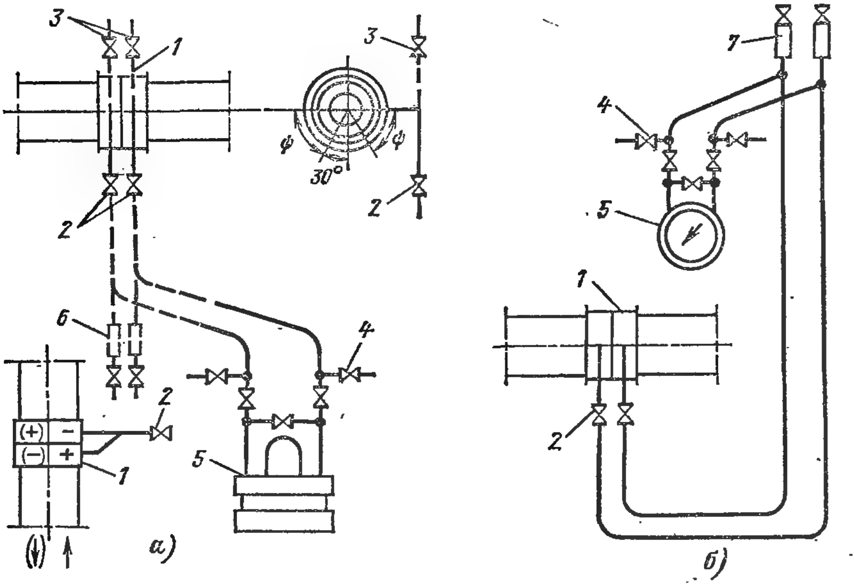


Рис. 14-7-4. Схема соединительных линий при измерении расхода жидкости с расположением дифманометра ниже (*а*) и выше (*б*) сужающего устройства.

1 — сужающее устройство; *2* — запорный вентиль; *3* — продувочный вентиль (устанавливается при необходимости); *4* — продувочный вентиль соединительной линии; *5* — дифманометр; *6* — отстойный сосуд с продувочным вентилем (устанавливается при необходимости); *7* — газосборник с вентилем для продувки.

способ установки дифманометра по отношению к сужающему устройству исключает при измерении расхода возможность попадания газа, который может выделиться из протекающей жидкости в трубопроводе, в соединительные линии и прибор. При прокладке соединительных линий они должны иметь на всем протяжении уклон в одну сторону.

Для горизонтальных и наклонных трубопроводов соединительные линии должны подключаться к нижней половине сужающего устройства под углом $\psi = 30—90°$. В верхней половине и в нижней части сужающего устройства соединительные линии подключать не рекомендуется, так как в первом случае в соединительные линии может поступать газ в процессе измерения, а во втором случае — осадки.

Если дифманометр будет установлен выше сужающего устройства, то в наивысших точках соединительных линий необходимо установить газосборники с вентилями для продувки (рис. 14-7-4,*б*). Газосборники с продувочными вентилями устанавливаются во всех случаях, когда в силу тех или иных условий прокладки соединительных линий образуются высокорасположенные отдельные участки линий, в которых могут скапливаться газы. Газосборники с вентилями для продувки устанавливаются также во всех наивысших точках соединительных линий в случаях невозможности выполнения одностороннего уклона, например, при обходе всевозможных препятствий (стен, трубопроводов и т. п.).

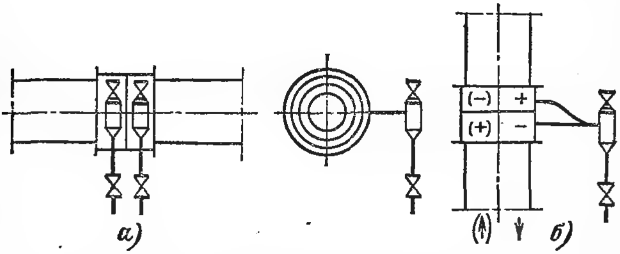


Рис. 14-7-5. Соединение сужающего устройства с уравнительными сосудами при температуре измеряемой жидкости свыше 120°С.

а — горизонтальный трубопровод; *б* — вертикальный трубопровод.

Для уменьшения возможности поступления газа из трубопровода в соединительные линии при установке дифманометра выше сужающего устройства трубки вблизи последнего прокладываются с U-образным изгибом, опускающимся ниже трубопровода не менее чем на 0,7 м.

При измерении расхода горячих жидкостей ($t > 120$°С) необходимо обеспечивать равенство температур жидкости в обеих соединительных линиях, так как в противном случае не будет иметь место равенство плотностей жидкости в трубках и возникнет дополнительная погрешность. Эта погрешность будет тем больше, чем больше объем «плюсовой» камеры дифманометра. Поэтому при применении для измерения горячих жидкостей поплавковых, кольцевых и сильфонных (за исключением сильфонных с силовой компенсацией) дифманометров необходимо в соединительные линии включать уравнительные сосуды, которые обеспечат равенство плотностей жидкости в линиях, соединяющих сосуды с прибором. Объем внутренней полости каждого сосуда должен быть не менее объема жидкости, перетекающей из уравнительного сосуда в дифманометр при изменении его показаний от нуля до верхнего предела измерения. При этом площадь поперечного сечения уравнительного сосуда должна быть не менее площади «плюсовой» камеры дифманометра.

Устройство уравнительных сосудов, а также и их расположение должны обеспечивать удаление газов (воздуха) из сосудов.

Включение уравнительных сосудов в соединительные линии производится по схемам, показанным на рис. 14-7-5. При этом для наклонных и вертикальных трубопроводов трубы, соединяющие сосуд с сужающим устройством, должны располагаться на одном уровне, соответствующем нижнему отверстию для отбора давления

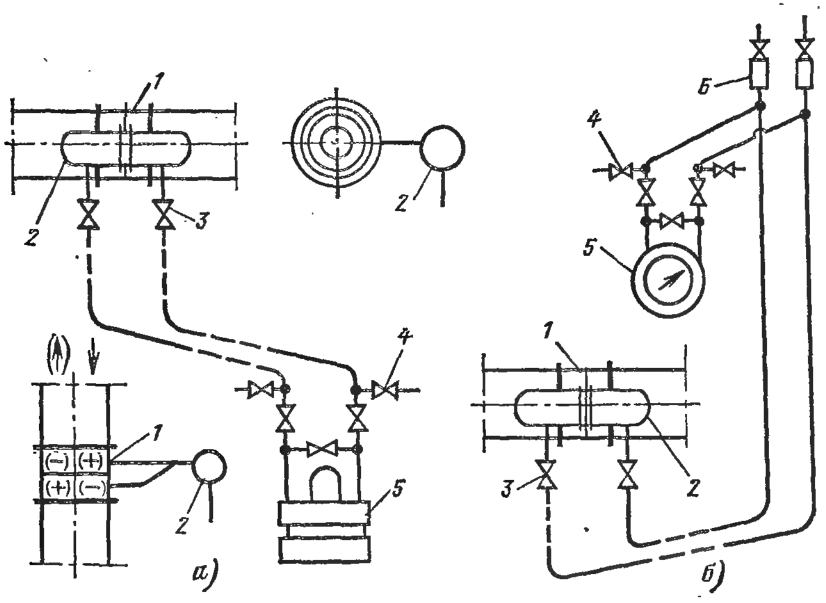


Рис. 14-7-6. Схема соединительных линий при измерении расхода пара с установкой дифманометра ниже (*а*) и выше (*б*) сужающего устройства.

1 — сужающее устройство; *2* — уравнительный сосуд; *3* — запорный вентиль; *4* — продувочный вентиль; *5* — дифманометр; *6* — газосборник с вентилем для продувки.

в сужающем устройстве. Трубу, соединяющую сосуд с верхним отверстием сужающего устройства, необходимо теплоизолировать.

При измерении расхода пара необходимо обеспечить постоянство и одинаковость верхних уровней конденсата в обеих соединительных линиях. Это достигается посредством включения в линии в непосредственной близости от сужающего устройства уравнительных сосудов (рис. 14-7-6). При измерении расхода в вертикальных и наклонных паропроводах боковые отверстия в уравнительных сосудах должны располагаться в плоскости верхнего отверстия для отбора давления в сужающем устройстве. Трубы, соединяющие отверстия для отбора давлений в сужающем устройстве с уравнительными сосудами, на участках вблизи сосудов должны располагаться горизонтально и на одном уровне. При этом необходимо эти трубы покрывать теплоизоляцией.

Для того чтобы можно было пренебречь дополнительной погрешностью при измерении расхода пара, которая может возникнуть из-за разности уровней конденсата в сосудах при быстром изменении расхода, уравнительные сосуды должны иметь достаточные размеры.

Для поплавковых, кольцевых и сильфонных дифманометров площадь F_c поперечного сечения в мм² уравнительного сосуда должна удовлетворять условию [61]:

$$F_c \geqslant 0{,}092\,(\rho_в - \rho_п)\,\frac{V}{\Delta p_н}, \qquad (14\text{-}7\text{-}3)$$

где $\rho_в$ и $\rho_п$ — плотность воды и пара при температуре насыщения, соответствующей рабочему давлению в паропроводе, кг/м³; V — объем «плюсовой» камеры дифманометра, мм³; $\Delta p_н$ — предельный номинальный перепад давления, кгс/м².

При измерении расхода пара дифманометр рекомендуется располагать ниже сужающего устройства и ниже уравнительных сосудов (рис. 14-7-6,*а*). Такой способ взаимного расположения сужающего устройства и дифманометра облегчает удаление воздуха из соединительных линий.

Если дифманометр при измерении расхода пара располагается выше сужающего устройства, то в наивысшей точке соединительных линий следует установить, так же как и при измерении расхода воды, газосборники с вентилями для продувки (рис. 14-7-6,*б*). Кроме того, необходимо прокладывать соединительные линии по выходе из уравнительных сосудов с U-образным изгибом, опускающимся вниз ниже паропровода не менее чем на 0,7 м.

При измерении расхода газа дифманометр следует устанавливать выше сужающего устройства, чтобы конденсат, образовавшийся в соединительных линиях, мог бы стекать в трубопровод (рис. 14-7-7). К сужающему устройству, установленному в горизонтальном или наклонном трубопроводе, соединительные линии следует присоединять к верхней половине его. Это исключает возможность попадания конденсата в соединительные линии из трубопровода. Прокладку соединительных линий желательно производить вертикально, но если дифманометр устанавливается не непосредственно над сужающим устройством, то соединительные линии следует прокладывать с уклоном, достаточным для стекания конденсата в трубопровод.

Если обеспечить односторонний уклон соединительных линий по всей их длине невозможно, последние должны быть снабжены коленами и в низших точках этих колен должны быть установлены сборники конденсата с вентилями для продувки. Кроме того, при измерении расхода горячих газов следует обеспечивать одинаковую температуру в обеих соединительных линиях.

Соединительные линии не рекомендуется прокладывать вблизи горячих поверхностей печей, трубопроводов и т. д. Если этого избежать нельзя, то обе соединительные линии следует покрыть теплоизоляцией.

В случае расположения дифманометра ниже сужающего устройства рекомендуется опускать соединительные линии до точки, лежащей ниже дифманометра, где необходимо устанавливать сборники конденсата с вентилями для продувки (рис. 14-7-7, *б*).

Соединительные линии с разделительными сосудами. Если при измерении расхода среды ее свойства или условия эксплуатации не позволяют присоединять дифманометр к сужающему устройству указанными выше способами, то в соединительные линии включают разделительные сосуды. Разделительные сосуды должны устанав-

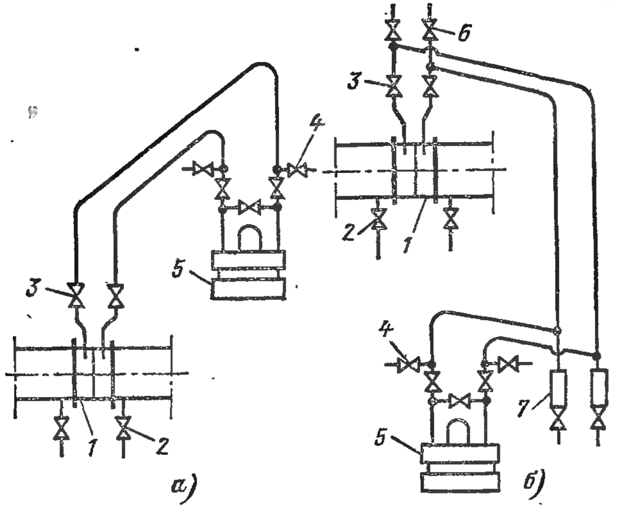


Рис. 14-7-7. Схема соединительных линий при измерении расхода газа с установкой дифманометра выше (*а*) и ниже (*б*) сужающего устройства.

1 — сужающее устройство; *2* — продувочный вентиль (устанавливается при необходимости); *3* — запорный вентиль; *4* — вентиль для продувки линии; *5* — дифманометр; *6* — продувочный вентиль дополнительный; *7* — отстойный сосуд с продувочным вентилем.

ливаться в соединительных линиях как можно ближе к сужающему устройству.

На рис. 14-7-8, *а* показана схема соединительных линий с разделительными сосудами при измерении расхода жидкости, плотность которой меньше плотности разделительной жидкости, а на рис. 14-7-8, *б*—при измерении расхода жидкости, плотность которой больше плотности разделительной жидкости.

На рис. 14-7-9 показана схема соединительных линий с разделительными сосудами при измерении расхода газа. На этой схеме дифманометр расположен ниже сужающего устройства; дифманометр можно установить и выше сужающего устройства.

Уровни разделительной жидкости в сосудах должны быть одинаковыми при нулевом перепаде давления. Разделительную жидкость

необходимо подбирать таким образом, чтобы она химически не взаимодействовала с измеряемой средой, не смешивалась с ней, а также не давала отложений и не воздействовала на материал разделительных сосудов, соединительных линий и внутренней полости дифманометра.

В качестве разделительной жидкости применяют воду, легкие минеральные масла, глицерин, водоглицериновые смеси, дибутилфталат, этиленгликоль, водоэтиленгликолевые смеси и другие жидкости.

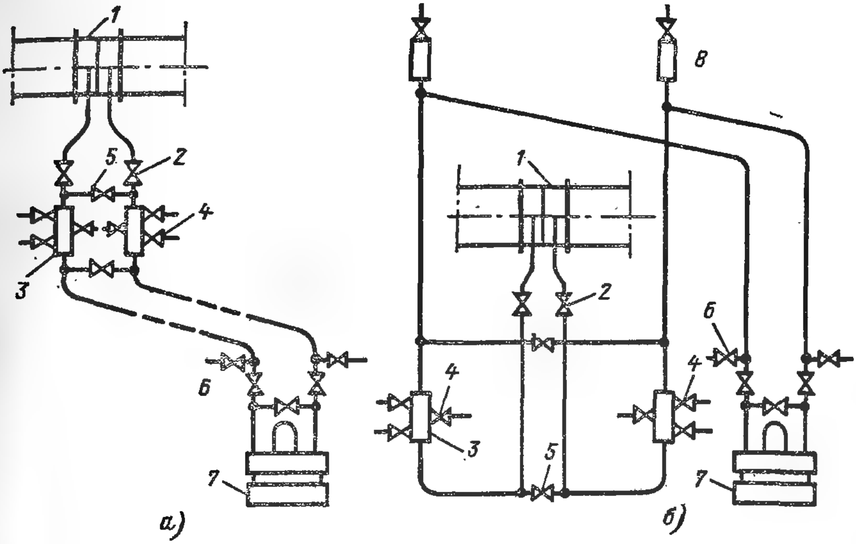


Рис. 14-7-8. Схема соединительных линий с разделительными сосудами при измерении расхода жидкости, плотность которой меньше (*а*) и больше (*б*) плотности разделительной жидкости.

1 — сужающее устройство; *2* — запорный вентиль; *3* — разделительный сосуд; *4* — контрольный вентиль; *5* — вспомогательный вентиль; *6* — продувочный вентиль; *7* — дифманометр; *8* — газосборник с вентилем для продувки.

Применение разделительных сосудов вследствие изменений уровней жидкости в них при колебаниях перепада давления связано с возникновением дополнительной погрешности в измерении расхода. Для снижения этой погрешности диаметр, мм, вертикальных разделительных сосудов согласно Правилам 28-64 [61] должен удовлетворять следующим условиям:

Для поплавковых дифманометров

$$D_{\text{р}} \geqslant 22 D_{\text{п}} D_{\text{см}} \sqrt{\frac{\pm(\rho_{\text{р.ж}} - \rho')}{(D_{\text{п}}^2 - D_{\text{см}}^2)(\rho_{\text{р}} - \rho_{\text{р.ж}})}}, \qquad (14\text{-}7\text{-}4)$$

где $D_{\text{п}}$ и $D_{\text{см}}$ — внутренний диаметр соответственно поплавкового и сменного сосуда дифманометра, мм; $\rho_{\text{р.ж}}$ — плотность раздели-

тельной жидкости при давлении p_1 и температуре разделительных сосудов, кг/м³; ρ' — плотность измеряемой среды при давлении p_1 и температуре разделительных сосудов, кг/м³; $\rho_р$ — плотность рабочей жидкости дифманометра, кг/м³.

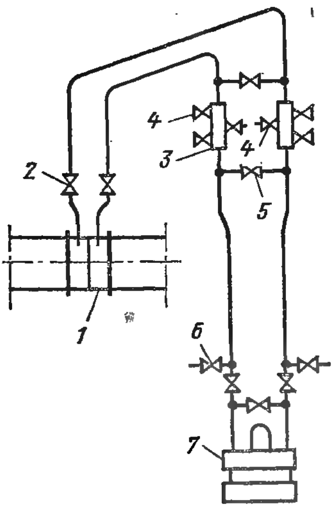


Рис. 14-7-9. Схема соединительных линий с разделительными сосудами при измерении расхода газа.

1 — сужающее устройство; *2* — запорный вентиль; *3* — разделительный сосуд; *4* — контрольный вентиль; *5* — вспомогательный вентиль; *6* — продувочный вентиль; *7* — дифманометр.

Для кольцевых дифманометров

$$D_р \geqslant 27 \sqrt{\frac{\pm (\rho_{р.ж} - \rho')\, F}{\rho_р - \rho_{р.ж}}}, \quad (14\text{-}7\text{-}5)$$

где F — площадь радиального сечения кольца дифманометра, мм².

Для сильфонного дифманометра (без силовой компенсации)

$$D_р \geqslant 0{,}7 D_с \sqrt{\frac{\pm (\rho_{р.ж} - \rho')\, \lambda}{\Delta p_н}}, \quad (14\text{-}7\text{-}6)$$

где $D_с$ — эффективный диаметр сильфона, мм; $\Delta p_н$ — предельный номинальный перепад давления дифманометра, кгс/м²; λ — перемещение дна сильфона, соответствующее верхнему пределу измерений дифманометра, мм.

Знак перед скобкой под корнем в приведенных выше неравенствах принимается таким, чтобы значение числителя дроби было положительным.

При измерении расхода мембранными дифманометрами и сильфонными дифманометрами с силовой компенсацией влияние разделительных сосудов пренебрежимо мало.

14-8. Погрешности измерения расхода

Измерение расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве относится к виду косвенных измерений. При измерении расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве следует учитывать неизбежные погрешности при определении отдельных величин, входящих в уравнения расхода (14-6-1), (14-6-2), (14-6-10) и (14-6-12), так как общая погрешность измерения расхода слагается из погрешностей этих величин.

Прежде чем рассматривать применяемый способ определения погрешности измерения расхода, необходимо обратить внимание на то, что уравнения расхода содержат две группы величин, а именно: величины, которые были найдены путем обработки большого числа измерений, и величины, измеряемые, как правило, однократно или определяемые по справочным данным.

К первой группе относятся величины α, ε и K. Для этих величин, найденных путем обработки большого числа измерений, известны средние квадратические и предельные погрешности и их доверительные вероятности. Следует указать, что для них справедлив рассмотренный выше закон сложения средних погрешностей.

Ко второй группе относятся величины Δp, t_1, p_1, d, φ и ρ, которые оцениваются основной допускаемой погрешностью, зависящей от класса точности применяемого прибора, или наибольшей (максимальной) погрешностью табличных данных. Величины $\rho_н$ и k_t, определяемые по справочным табличным данным, относятся также ко второй группе, так как они могут быть оценены только максимальной погрешностью. Доверительная вероятность погрешностей величин, отнесенных ко второй группе, неизвестна.

Указанное деление величин на две группы не может служить обоснованием к применению для оценки точности измеренного расхода закона сложения средних погрешностей при косвенном измерении в строгом его понимании.

В качестве такого обоснования правила 28-64 делают допущение, что основная допустимая погрешность, определяемая классом точности применяемого прибора, и максимальная погрешность величин, находимые по справочным данным, равны удвоенной средней квадратической (предельной) погрешности, для которой доверительная вероятность составляет 95%. Следует отметить, что принятое в Правилах 28-64 допущение нельзя считать достаточно обоснованным.

Ниже рассматривается рекомендуемый Правилами 28-64 способ оценки погрешности измерения расхода.

Предельная относительная погрешность измерения расхода δ_Q равна:

$$\delta_Q = 2\sigma_Q + \delta_l, \tag{14-8-1}$$

где σ_Q — средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода, %; δ_l — погрешность, учитывающая влияние уменьшения длины прямого участка трубопровода перед сужающим устройством или за ним, % (§ 14-7).

Предельная относительная погрешность измерения расхода, отнесенная к верхнему пределу измерений дифманометра (комплекта) $Q_{в.п}$, равна:

$$\delta'_Q = \frac{(2\sigma_Q + \delta_l)\,Q}{Q_{в.\,п}}, \tag{14-8-2}$$

где Q — измеренный расход.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром или вторичным прибором, работающим в комплекте с ним, подсчитывается по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + 4\sigma_d^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2}. \tag{14-8-3}$$

При принятых допусках на диаметр цилиндрического отверстия сужающего устройства (§ 14-2) погрешностью $4\sigma_d^2$ согласно [61]

можно пренебречь ввиду ее малости по сравнению с остальными слагаемыми. В этом случае формула (14-8-3) принимает вид:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2}, \tag{14-8-4}$$

где σ_α — средняя квадратическая относительная погрешность коэффициента расхода, %; σ_ε — средняя квадратическая относительная погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой среды, %; $\sigma_{\sqrt{\Delta p}}$ — средняя квадратическая относительная погрешность показаний (записи) по шкале (диаграмме) дифманометра (комплекта) при измерении расхода Q в % по расходу; σ_ρ — средняя квадратическая относительная погрешность значения плотности измеряемой среды, %.

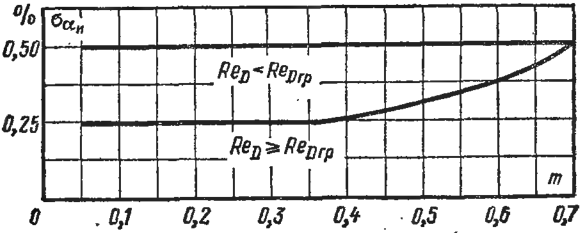


Рис. 14-8-1. Средняя квадратическая погрешность исходного коэффициента расхода диафрагм.

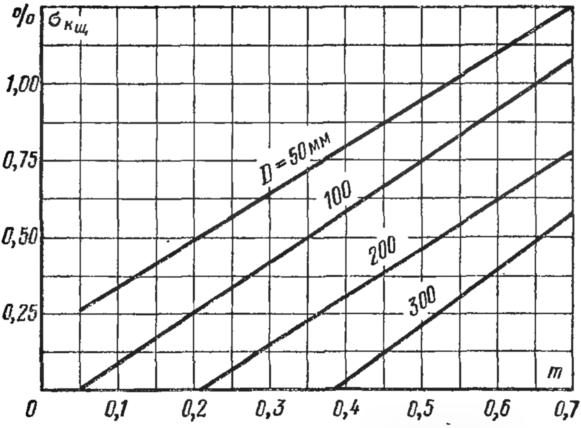


Рис. 14-8-2. Средняя квадратическая погрешность поправочного множителя на шероховатость $k_ш$ для диафрагм.

Далее рассмотрим определение погрешностей отдельных величин, входящих в уравнение расхода.

Погрешность коэффициента расхода. Средняя квадратическая относительная погрешность коэффициента расхода вычисляется по формулам:

для диафрагм

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\sigma^2_{\alpha_и} + \sigma^2_{k_ш} + \sigma^2_{k_н} + (\sigma_\alpha)^2_{Re} + (\sigma_\alpha)^2_D}; \qquad (14\text{-}8\text{-}5)$$

для сопл и сопл Вентури

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\sigma^2_{\alpha_и} + \sigma^2_{k_ш} + (\sigma^2_\alpha)_{Re} + (\sigma_\alpha)^2_D}. \qquad (14\text{-}8\text{-}6)$$

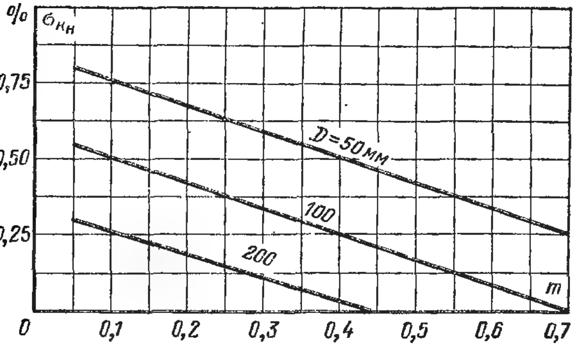


Рис. 14-8-3. Средняя квадратическая погрешность поправочного множителя на неостроту входной кромки диафрагмы $k_н$.

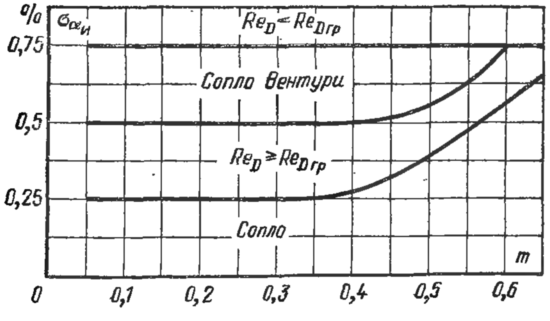


Рис. 14-8-4. Средняя квадратнческая погрешность исходного коэффицнента расхода сопл и сопл Вентури.

Для диафрагм средние квадратические относительные погрешности $\sigma_{\alpha_и}$, $\sigma_{k_ш}$ и $\sigma_{k_н}$ соответственно исходного коэффициента расхода $\alpha_и$, поправочного множителя на шероховатость трубопровода $k_ш$ и поправочного множителя на неостроту входной кромки $k_н$ приведены на рис. 14-8-1—14-8-3. Для сопл и сопл Вентури значения $\sigma_{\alpha_и}$

и $\sigma_{k_ш}$ приведены на рис. 14-8-4 и 14-8-5. Значение $(\sigma_\alpha)_{Re} = 0{,}15\%$ учитывает неточность поправки ΔQ (14-3-6) на влияние числа Рейнольдса или погрешность от пренебрежения этой поправкой. Если при расходе, равном $Q_{ср}$, $Re_D > Re_{Dгр}$, то погрешность $(\sigma_\alpha)_{Re}$ не учитывается.

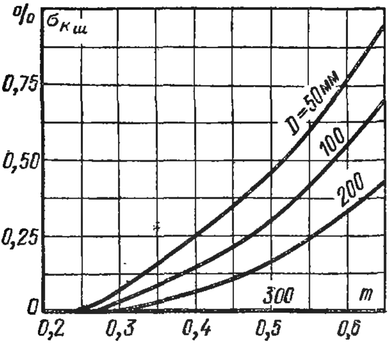


Рис. 14-8-5. Средняя квадратическая погрешность поправочного коэффициента на шероховатость $k_ш$ для сопл и сопл Вентури.

Значение $(\sigma_\alpha)_D$ учитывает погрешность определения $\alpha_и$, обусловленную отклонением действительного диаметра трубопровода от номинального (§ 14-7), и равно:

$$(\sigma_\alpha)_D = 0{,}3\frac{m^2}{\alpha_и}. \qquad (14\text{-}8\text{-}7)$$

Погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой среды. Средняя квадратическая относительная погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой среды ε определяется по формуле

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma^2_{\varepsilon_{ср}} + (\sigma_{\varepsilon_1})^2}, \qquad (14\text{-}8\text{-}8)$$

где $\sigma_{\varepsilon_{ср}}$ — средняя квадратическая погрешность значения $\varepsilon_{ср}$ (§ 14-4), согласно формуле

$$\sigma_{\varepsilon_{ср}} = n\frac{\Delta p_{ср}}{p_1}. \qquad (14\text{-}8\text{-}9)$$

Здесь n — множитель, равный 1% для сопл, 2% для диафрагм при $m \leqslant 0{,}56$ и 4% для диафрагм при $m > 0{,}56$; $\frac{\Delta p_{ср}}{p_1}$ — см. формулу (14-4-3); σ_{ε_1} — средняя квадратическая относительная погрешность, учитывающая отклонение действительного значения ε от $\varepsilon_{ср}$.

Значение σ_{ε_1} вычисляется по формуле

$$\sigma_{\varepsilon_1} = \frac{(\varepsilon_{ср} - \varepsilon)\,100}{2\varepsilon}, \qquad (14\text{-}8\text{-}10)$$

где ε соответствует $\Delta p/p_1$ и определяется, как указано в § 14-4.

Погрешность показаний по шкале (диаграмме) дифманометра (комплекта). Средняя квадратическая относительная погрешность показаний по шкале (диаграмме) дифманометра (комплекта) подсчитывается по формуле

$$\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \frac{\delta_Q Q_{в.п}}{2Q}, \qquad (14\text{-}8\text{-}11)$$

где δ_Q — основная допустимая погрешность показаний по шкале (диаграмме) дифманометра (комплекта) в % по расходу.

Погрешность плотности измеряемой среды. Если плотность при измерении расхода подсчитывается по формуле (14-5-1), то средняя квадратическая относительная погрешность значения ρ определяется по формуле

$$\sigma_\rho = \frac{100}{2}\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho_{20}}{\rho_{20}}\right)^2 + \frac{(t-20)^2(\Delta\beta)^2+\beta^2(\Delta t)^2}{[1-\beta(t-20)]^2}}, \qquad (14\text{-}8\text{-}12)$$

где $\Delta\rho_{20}$ и $\Delta\beta$ — максимальные абсолютные погрешности табличных значений соответственно ρ_{20} и β, равные половине единицы разряда последней значащей цифры; Δt — основная допускаемая абсолютная погрешность величины t_1, °С.

Для вычисления средней квадратической относительной погрешности значения плотности сухого газа ρ, определяемой по уравнению (14-5-2), пользуются формулой

$$\sigma_\rho = \sqrt{\sigma^2_{\rho_н} + \sigma^2_{p_1} + \sigma^2_{T_1} + \sigma^2_k}. \qquad (14\text{-}8\text{-}13)$$

Средняя квадратическая относительная погрешность $\sigma_{\rho_н}$ значения $\rho_н$ определяется по формуле

$$\sigma_{\rho_н} = \frac{100\Delta\rho_н}{2\rho_н}, \qquad (14\text{-}8\text{-}14)$$

где $\Delta\rho_н$ — максимальная абсолютная погрешность величины $\rho_н$, равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении $\rho_н$.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения давления σ_p подсчитывается по формуле

$$\sigma_p = \frac{p_{в.п}\delta_p}{2p_1}, \qquad (14\text{-}8\text{-}15)$$

где $p_{в.п}$ — верхний предел измерений манометра; p_1 — значение измеренного давления; δ_p — основная допускаемая погрешность манометра (комплекта), %.

Погрешность определения температуры измеряемой среды зависит от класса точности применяемых приборов и условий измерения. Если абсолютная допускаемая погрешность измерения температуры равна Δt, то средняя квадратическая относительная погрешность равна:

$$\sigma_{T_1} = \frac{100\Delta t}{2T_1}. \qquad (14\text{-}8\text{-}16)$$

Средняя квадратическая относительная погрешность σ_k определения значения коэффициента сжимаемости газов К приведена в [61].

Средняя квадратическая относительная погрешность плотности измеряемой среды, определяемой по таблицам в зависимости от давления и температуры, вычисляется по формуле

$$\sigma_\rho = \sqrt{\sigma^2_{\rho T} + \sigma^2_p + \sigma^2_t}. \qquad (14\text{-}8\text{-}17)$$

Средняя квадратическая относительная погрешность табличного значения плотности $\sigma_{\rho T}$ составит:

$$\sigma_{\rho T} = \frac{100\Delta\rho}{2\rho}, \qquad (14\text{-}8\text{-}18)$$

где $\Delta\rho$ — максимальная абсолютная погрешность табличного значения ρ, равная половине единицы разряда последней значащей цифры.

Значение σ_p определяется по формуле (14-8-15); средняя квадратическая относительная погрешность определения температуры измеряемой среды подсчитывается по формуле

$$\sigma_t = \frac{100\Delta t}{2t_1}. \qquad (14\text{-}8\text{-}19)$$

Для перегретого водяного пара предельная (максимальная) относительная погрешность табличных значений плотности (табл. П14-5-2) $\delta_{\rho T} = \pm 0{,}2\%$.

Предельные относительные погрешности табличных значений плотности воды (табл. П14-5-1), находящейся под давлением выше атмосферного, равны: $\pm 0{,}02\%$ при $t \leqslant 50°C$, $\pm(0{,}03—0{,}04)\%$ при $50 < t \leqslant 200°C$, $\pm(0{,}04—0{,}06)\%$ при $t > 200°C$.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения количества вещества самопишущим дифманометром (вторичным прибором) вычисляется по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2 + \sigma_д^2 + \sigma_п^2}. \qquad (14\text{-}8\text{-}20)$$

Значения σ_α, σ_ε и σ_ρ определяются, как указано выше, а $\sigma_{\sqrt{\Delta p}}$ вычисляется по формуле (14-8-11), причем значение Q берется равным среднему часовому расходу по диаграмме.

Средняя квадратическая относительная погрешность хода диаграммы равна:

$$\sigma_д = 0{,}035\Delta\tau, \qquad (14\text{-}8\text{-}21)$$

где $\Delta\tau$ — допускаемая погрешность хода диаграммы за 24 ч (± 3 мин для приборов с часовым приводом и ± 5 мин для приборов с электрическим и пневматическим приводами).

Средняя квадратическая относительная погрешность планиметра определяется по формуле

$$\sigma_п = 0{,}5\delta_п, \qquad (14\text{-}8\text{-}22)$$

где $\delta_п$ — основная допускаемая погрешность планиметра, %.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения количества вещества интегратором, установленным на дифманометре, вторичном приборе, или интегратором, работающим от унифицированного сигнала, определяется по формуле (14-8-4) с добавлением под корнем слагаемого $\sigma_{ин}^2$. Значение $\sigma_{ии}$ подсчитывается по формуле

$$\sigma_{ин} = \frac{Q_{в.п}\delta_{ин}}{2Q}, \qquad (14\text{-}8\text{-}23)$$

где $\delta_{ин}$ — допускаемая погрешность показаний интегратора, %; Q — средний часовой расход по интегратору.

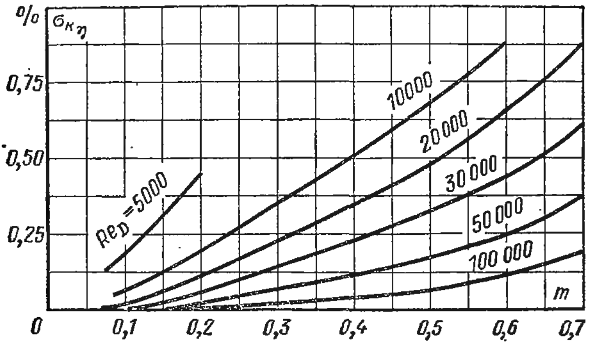


Рис. 14-8-6. Средняя квадратическая погрешность поправочного множителя k_η, учитывающего влияние числа Рейнольдса, для диафрагм.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода переносным U-образным или чашечным дифманометром определяется по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \frac{1}{4}\sigma_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2}, \qquad (14\text{-}8\text{-}24)$$

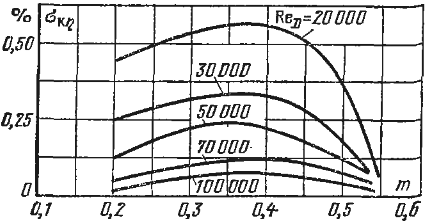


Рис. 14-8-7. Средняя квадратическая погрешность поправочного множителя k_η, учитывающего влияние числа Рейнольдса, для сопл и сопл Вентури.

где $\sigma_{\Delta p}$ — средняя квадратическая относительная погрешность при измерении перепада давления переносным дифманометром, %; согласно формуле

$$\sigma_{\Delta p} = \frac{100\Delta h}{2\Delta p}. \qquad (14\text{-}8\text{-}25)$$

Здесь Δh — основная допускаемая абсолютная погрешность переносного дифманометра (§ 9-1), кгс/м², а Δp — измеренный средний перепад давления, кгс/м².

Средняя квадратическая относительная погрешность коэффициента расхода, входящая в выражение (14-8-24), подсчитывается для диафрагм по формуле

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\sigma_{\alpha_и}^2 + \sigma_\eta^2 + \sigma_{k_ш}^2 + \sigma_{k_н}^2}, \qquad (14\text{-}8\text{-}26)$$

для сопл и сопл Вентури слагаемое $\sigma_{k_н}^2$ исключается. Значения $\sigma_{\alpha_и}$, $\sigma_{k_ш}$ и $\sigma_{k_н}$ определяются, как указано выше, а σ_η — по рис. 14-8-6 и 14-8-7.

Средняя квадратическая относительная погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой среды σ_ε, входящая в выражение (14-8-24), определяется по формуле (14-8-8). При этом значение $\Delta p_{ср}$ принимается равным измеренному среднему перепаду давления переносным дифманометром. Значение σ_ρ определяется, как указано выше.

14-9. Основные сведения о методике расчета сужающих устройств

В этом параграфе излагаются основные сведения о методике расчета сужающих устройств для измерения расхода жидкости, газа и пара [1]. Расчет сужающего устройства производят на основании задания измеряемой среды и условий измерения, т. е. величин $p_{1и}$, t_1, D_{20}, $Q_{ср}$, $Q_{макс}$, $p_п$ *. Если измеряемая среда — газ, то в задание необходимо включить состав газа в процентах по объему, влажность газа относительную или абсолютную, плотность сухой части влажного газа в нормальном состоянии и среднее местное барометрическое давление. На основании указанного задания определяют недостающие для расчета данные (§ 14-3, 14-5 и 14-6).

В задание для расчета сужающего устройства должны быть включены также необходимые сведения об участке трубопровода, где будет установлено сужающее устройство (§ 14-7). Если свойства измеряемой среды не позволяют осуществить непосредственное подключение дифманометра к сужающему устройству и требуют применения разделительных сосудов (§ 14-7), то эти сведения также должны быть включены в задание на расчет сужающего устройства.

В зависимости от задания и требований, предъявляемых к измерению расхода вещества, производят выбор типа сужающего устройства и дифманометра с отсчетным устройством или снабженного передающим преобразователем для работы в комплекте с вторичным прибором, с информационной или управляющей вычислительной машиной.

При измерении расхода вещества в пожаро- и взрывоопасном помещении дифманометры, потребляющие электроэнергию, должны удовлетворять требованиям соответствующих нормативных документов.

Давление среды, расход которой необходимо измерять, не должно превышать предельно допускаемого избыточного рабочего давления выбранного дифманометра.

Предельный номинальный перепад давления дифманометра $\Delta p_н$ необходимо выбирать из ряда чисел, установленного для данного прибора в соответствии с ГОСТ 18140-77. Для некоторых типов

---

[1] Подробные сведения о методике расчета сужающих устройств см. Правила 28-64.

* При расчете сужающих устройств для измерения расхода питательной воды и перегретого пара, вырабатываемого парогенератором, обычно принимают $Q_{ср} = Q_{макс}$.

дифманометров значения $\Delta p_н$ приведены в гл. 12. При этом необходимо иметь в виду, что чем больше выбранный перепад давления $\Delta p_н$, тем меньше будет значение m сужающего устройства для измерения заданного расхода. При уменьшении m повышается точность измерений и расширяется область измерений без поправки на влияние чисел Рейнольдса у диафрагм. В то же время при уменьшении m сокращаются необходимые длины прямых участков трубопровода, уменьшается влияние отклонений действительного диаметра трубопровода от принятого при расчете и снижаются требования к точности установки сужающего устройства. Однако необходимо учитывать, что при уменьшении m возрастает потеря давления в сужающем устройстве.

Если задана допускаемая потеря давления $p_п$ в сужающем устройстве, то выбирают такое наибольшее значение $\Delta p_н$, а вместе с тем и m (см. рис. 14-2-11), при которых потеря давления должна оставаться меньше допускаемой.

Верхний предел измерения дифманометра $Q_{в.п}$ выбирается по заданному максимальному измеряемому расходу $Q_{макс}$ так, чтобы стандартное значение $Q_{в.п}$, взятое из ряда, приведенного в § 12-1, было ближайшее большее по отношению к значению $Q_{макс}$.

Формулы, необходимые для расчета сужающего устройства, следуют из уравнений расхода (14-6-1) и (14-6-2). После преобразований получим:

$$\alpha m = \frac{Q_{м.в.п}}{1{,}252 \cdot 10^{-2} \varepsilon D^2 \sqrt{\rho \Delta p}}; \qquad (14\text{-}9\text{-}1)$$

$$\alpha m = \frac{Q_{о.в.п}}{1{,}252 \cdot 10^{-2} \varepsilon D^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}}. \qquad (14\text{-}9\text{-}2)$$

В этих формулах Δp — наибольший перепад давления в сужающем устройстве (кгс/м^2) при расходе $Q_{в.п}$. При использовании колокольного с пружинным уравновешиванием, кольцевого с замкнутой кольцевой трубкой, мембранного или сильфонного дифманометра перепад давления Δp принимают равным выбранному предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_н$ (кгс/м^2). При вычислении наибольшего перепада давления Δp в сужающем устройстве по предельному номинальному перепаду давления $\Delta p_н$ поплавкового дифманометра необходимо учитывать плотность среды, находящейся над рабочей жидкостью прибора (§ 12-4 и 14-6).

Если по заданию измеряемая среда — жидкость, то поправочный множитель ε, входящий в формулы (14-9-1) и (14-9-2), равен единице. При измерении расхода газа или пара для определения поправочного множителя ε кроме известных величин $\Delta p_{ср}/p_1$ и k необходимо значение m.

Расчет производится методом последовательных приближений.

В первом этапе расчета для определения ε можно задаться значением m, например, принять его равным 0,3—0,4 для диафрагмы и 0,5—0,6 — для сопла или сопла Вентури, что соответствует

наиболее часто применяемым значениям m. Тогда, зная все необходимые величины ($\Delta p_{ср}/p_1$, m и k), можно по номограммам П14-4-1—П14-4-3 найти приближенное значение ε_1.

Подставляя в формулу (14-9-1) или (14-9-2) найденное приближенное значение ε_1 и значения других известных величин, определяют в первом приближении произведение $\alpha_1 m_1$. По значению произведения $\alpha_1 m_1$ находят по рис. 14-9-1 для диафрагмы и по рис. 14-9-2 — для сопла и сопла Вентури в первом приближении значение коэффициента расхода $\alpha_{и1}$. Значение m_1, соответствующее найденному $\alpha_{и1}$, определяют по формуле

$$m_1 = \frac{\alpha_1 m_1}{\alpha_{и1}}. \tag{14-9-3}$$

Далее определяют число Рейнольдса Re_D (§ 14-3) при расходе, равном $Q_{ср}$. Если вычисленное значение $\mathrm{Re}_D < \mathrm{Re}_{D\,мин}$ для полученного модуля (см. рис. 14-3-7 и 14-3-8), то при принятых параметрах расходомера измерять расход данным методом невозможно. В случае $\mathrm{Re}_D > \mathrm{Re}_{D\,мин}$ расчет можно продолжить. Во всех случаях для повышения точности измерений желательно иметь $\mathrm{Re}_D > \mathrm{Re}_{D\,гр}$ (табл. 14-3-1).

Затем для полученного в первом приближении значения m_1 определяют поправочный множитель ε_2, как было указано выше. Если $D < 300$ мм, то по известному значению m_1 необходимо найти поправочный множитель на шероховатость трубопровода $k_ш$ по рис. 14-3-9 для диафрагмы и по рис. 14-3-10 для сопла и сопла Вентури. При расчете диафрагмы необходимо также определить поправочный множитель на недостаточную остроту входной кромки ее $k_н$ (рис. 14-3-11).

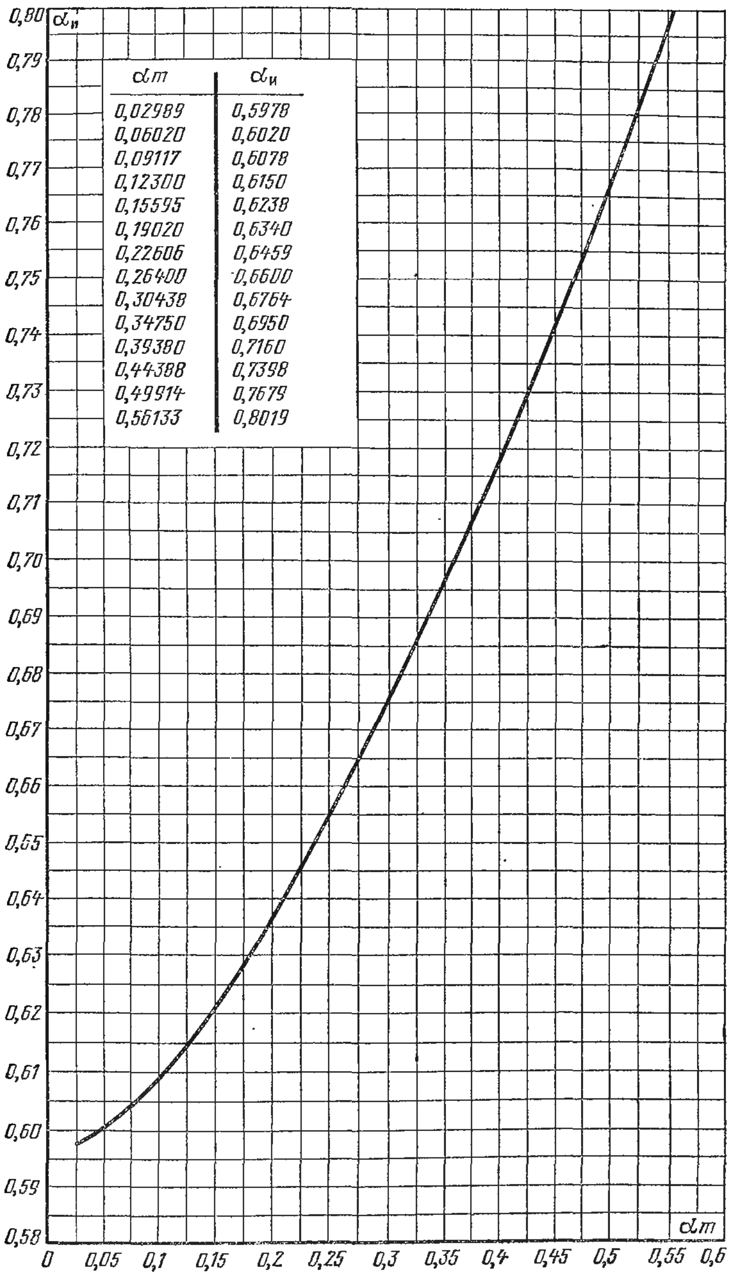
Полученные значения ε_2, $k_ш$ и $k_н$ (для сопла и сопла Вентури $k_н = 1$) позволяют найти во втором приближении коэффициент расхода $\alpha_2 = \alpha_{и1} k_ш k_н$ и значение модуля m_2 по формуле

$$m_2 = \frac{\alpha_1 m_1 \varepsilon_1}{\alpha_2 \varepsilon_2} = \frac{\alpha_1 m_1 \varepsilon_1}{\alpha_{и1} k_ш k_н \varepsilon_2}. \tag{14-9-4}$$

По подсчитанному значению m_2 находят соответствующие ему значения величин $\alpha'_н$, $k'_ш$, $k'_н$ и ε_3 и определяют $\alpha_3 = \alpha'_и k'_ш k'_и$ и m_3 в третьем приближении по формуле

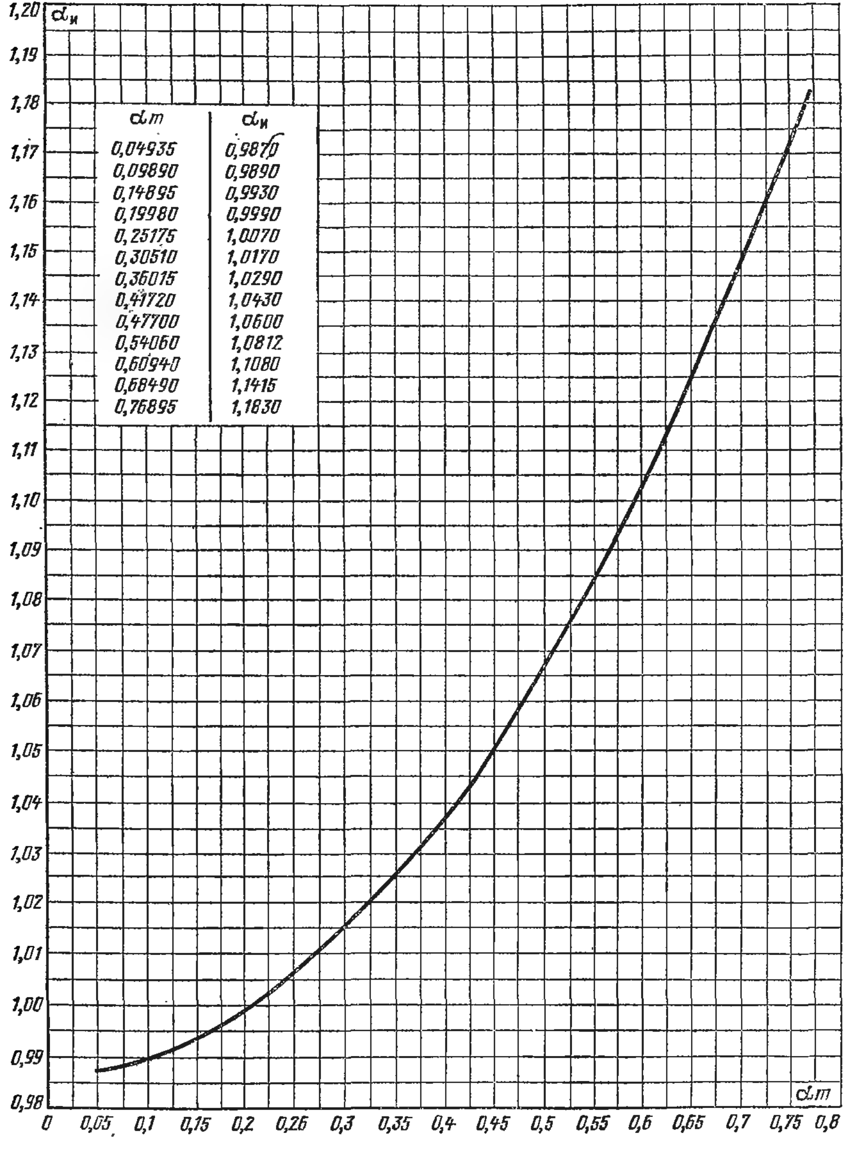
$$m_3 = \frac{\alpha_2 m_2 \varepsilon_2}{\alpha_3 \varepsilon_3} = \frac{\alpha_2 m_2 \varepsilon_2}{\alpha'_и k'_ш k'_н \varepsilon_3}. \tag{14-9-5}$$

Затем по модулю m_3 находят значения $\alpha''_и$, $k''_ш$, $k''_и$ и ε_4 и определяют $\alpha_4 = \alpha''_и k''_ш k''_н$. Если коэффициент расхода α_4 отличается от α_3 только четвертым десятичным знаком, то вычисленное значение m_3 может считаться окончательным, т. е. m принимают равным m_3. В противном случае продолжается дальнейшее уточнение модуля. Полученное окончательное значение $m = m_3$ служит для определения величин $\alpha_н$, $k_ш$, $k_н$ и ε, а также искомого значения d_{20} диаметра отверстия сужающего устройства при 20°С, которое подсчитывается (с четырьмя



αm	$\alpha_и$
0,02989	0,5978
0,06020	0,6020
0,09117	0,6078
0,12300	0,6150
0,15595	0,6238
0,19020	0,6340
0,22606	0,6459
0,26400	0,6600
0,30438	0,6764
0,34750	0,6950
0,39380	0,7160
0,44388	0,7398
0,49914	0,7679
0,56133	0,8019

Рис. 14-9-1. Исходный коэффициент расхода стандартных диафрагм в зависимости от αm.



αm	$\alpha_и$
0,04935	0,9870
0,09890	0,9890
0,14895	0,9930
0,19980	0,9990
0,25175	1,0070
0,30510	1,0170
0,36015	1,0290
0,41720	1,0430
0,47700	1,0600
0,54060	1,0812
0,60940	1,1080
0,68490	1,1415
0,76895	1,1830

Рис. 14-9-2. Исходный коэффициент расхода стандартных сопл и сопл Вентури в зависимости от αm.

значащими цифрами) по формуле

$$d_{20} = \frac{D}{k'_t} \sqrt{m}, \qquad (14\text{-}9\text{-}6)$$

где k'_t — поправочный множитель согласно формуле (14-6-3).

В случае измерения расхода жидкости ($\varepsilon = 1$) найденное значение m_2 по формуле (14-9-4) является окончательным ($m = m_2$).

В целях проверки правильности выполненного расчета определяют ε, как было сказано выше, коэффициент расхода α для полученного значения m и заданного D, а также $d = d_{20}k'_t$ и по соответствующей формуле (§ 14-6) определяют расход $Q_{\text{в.п}}$, соответствующий наибольшему перепаду давления Δp. Полученное значение расхода в результате подсчета не должно отличаться от заданного $Q_{\text{в.п}}$ более чем на 0,1%.

Далее на основании формул, приведенных в § 14-3, определяют поправку ΔQ к показаниям расходомера, учитывающую влияние числа Рейнольдса в пределах рабочей части шкалы прибора ($Q \geqslant 0{,}3Q_{\text{в.п}}$). Если при расходе, равном $Q_{\text{ср}}$, $\text{Re}_D > \text{Re}_{D\text{гр}}$, то поправку ΔQ не определяют.

По окончании расчета сужающего устройства определяют погрешность измерения расхода по методике, изложенной в § 14-8.

14-10. Измерение расхода на входе в трубопровод или на выходе из него

Для измерения расхода жидкостей, газов и пара на входе в трубопровод или на выходе из него можно применять стандартные диафрагмы и сопла при условии, что объем пространства, с которым соединен трубопровод, достаточно большой. При этом необходимо иметь в виду, что условия работы сужающего устройства в рассматриваемом случае отличаются от условий работы такого же сужающего устройства, установленного внутри трубопровода.

При одной и той же среде снаружи трубопровода и внутри его (воздух) указанные отличия обусловливаются лишь изменениями характера входа потока в сужающее устройство, когда последнее установлено на входе в трубопровод, или выхода, когда сужающее устройство установлено на выходе из него.

Если же среда снаружи трубопровода и внутри его различна, например, при вытекании жидкости из трубопровода в окружающую атмосферу, то имеют место дополнительные отличия, обусловленные силами поверхностного натяжения.

Точность измерения расхода на входе в трубопровод или на выходе из него по перепаду давления в сужающем устройстве в большой степени зависит от соблюдения ряда условий при его установке.

Участки трубопровода за сужающим устройством при измерении на входе и до сужающего устройства при измерении на выходе должны быть прямыми. При выборе длины этих участков необходимо руководствоваться указаниями § 14-7.

При измерении расхода на входе в трубопровод (например, на всасе воздуходувной машины) необходимо, чтобы торцевая поверхность диафрагмы или сопла была гладкой в пределах круга диаметром не менее 1,5 d. Кроме того, перед сужающим устройством на расстояниях, не меньших $20D$ по направлению его оси, и 10 D — по направлениям, перпендикулярным оси трубопровода, не должно быть никаких препятствий (перегородок, стенок и т. п.), возмущающих поток.

При измерении на выходе из трубопровода всевозможные препятствия, возмущающие поток, должны находиться от выхода на расстояниях не меньше 10 D по направлению оси трубопровода и 5 D — по направлениям, перпендикулярным его оси.

При измерении расхода на входе в трубопровод отбор давления p_1 производят до сужающего устройства, т. е. в пространстве, из которого происходит истечение вещества, а отбор давления p_2 производят за сужающим устройством. Отбор давления p_2 можно осуществлять как при помощи кольцевой камеры, так и при помощи отдельных отверстий. При изготовлении диафрагм или сопл, а также кольцевой камеры или отдельных отверстий для отбора давления p_2 необходимо руководствоваться указаниями для диафрагм и сопл, изложенными выше.

В случае измерения расхода по перепаду давления в сужающем устройстве, установленном на входе трубопровода, и при соблюдении указанных выше условий исходный коэффициент расхода $\alpha_и$ для чисел Рейнольдса $\mathrm{Re}_D \geqslant 55\,000$ остается постоянным и его значение не зависит от m. Исходный коэффициент расхода сужающего устройства, установленного на входе трубопровода, согласно опытным данным (Правила 27-54) для $\mathrm{Re}_D \geqslant 55\,000$ равен $\alpha_и = 0{,}60$ для диафрагм и $\alpha_и = 0{,}99$ для сопл. При этом предельная погрешность при доверительной вероятности 0,95 для этих значений коэффициентов расхода равна $\pm 1{,}5\%$ для диафрагм и $\pm 1\%$ для сопл.

Поправочный множитель к коэффициенту расхода на неостроту входной кромки диафрагмы при $D \leqslant 300$ мм, а также его погрешность определяются так же, как и при нормальном способе измерения.

Измерение расхода на входе в трубопровод с помощью стандартных диафрагм и сопл при $\mathrm{Re}_D < 55\,000$ производиться не может, так как надежных экспериментальных данных для коэффициентов расхода не имеется.

При измерении расхода на выходе из трубопровода отбор давления p_1 производят перед сужающим устройством, а отбор давления p_2 производят за сужающим устройством, т. е. в пространстве, куда происходит истечение вещества.

Граничные числа Рейнольдса, коэффициенты расхода диафрагм и сопл, поправочные множители и их погрешности при измерении расхода на выходе из трубопровода имеют те же значения, что и при нормальном способе измерения расхода. При применении же стандартных сопл для измерения расхода на выходе из трубопровода

Правила 27-54 рекомендуют исходный коэффициент расхода для них, найденный для сопл в случае нормальных измерений, уменьшить на 0,005.

Предельная погрешность исходного коэффициента расхода диафрагм и сопл при измерении на выходе остается такой же, как и в случае измерений на входе.

При измерении расхода жидкости (воды) на выходе из трубопровода в газовую (воздушную) среду стандартные сопла не применяются из-за возможности отрыва струи от стенки сопла в его цилиндрической части. Для измерения расхода жидкости на выходе из трубопровода в газовую среду рекомендуется применять стандартные диафрагмы. При этом расчет таких диафрагм при $d \geqslant 15$ мм, как указывается в Правилах 27-54, следует производить по методике для нормальных измерений, т. е. когда диафрагма устанавливается внутри трубопровода.

Необходимо также отметить, что на конференции ИСО/Тс30 в 1956 г. в Мюнхене при обсуждении результатов исследований диафрагм для измерения расхода жидкости на выходе из трубопровода в воздушную среду была принята в качестве основной работа Гюи Тибессарда (Льежский университет). Опыты, проведенные им [69] с диафрагмами, имеющими $d = 15$, 25, 35, 40 мм и $m = 0{,}09$; 0,25; 0,49; 0,64, показали, что у диафрагм при измерении расхода воды на выходе из трубопровода в воздушную среду коэффициенты расхода на 0,1—0,4% больше, чем у диафрагм при нормальном способе измерений. Отбор давлений p_1 и p_2 производился с помощью кольцевых камер.

14-11. Измерение расхода при малых числах Рейнольдса

Во многих случаях инженерной практики приходится встречаться с необходимостью измерения расхода при малых числах Рейнольдса. Выше отмечалось, что коэффициенты расхода стандартных сужающих устройств при числах Рейнольдса ниже граничных изменяются с изменением числа Рейнольдса. Эти изменения не всегда могут быть учтены с помощью поправочных множителей, так как коэффициенты расхода изменяются не всегда закономерно. Так, например, для стандартных диафрагм с уменьшением числа Рейнольдса ниже граничного они вначале увеличиваются, а затем при дальнейшем уменьшении числа Рейнольдса очень быстро падают. Это обстоятельство исключает возможность применения стандартных

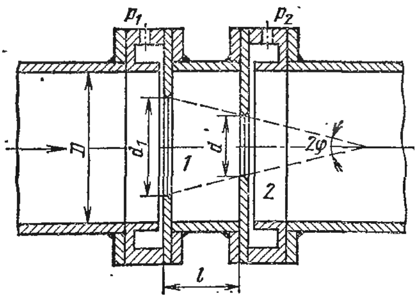


Рис. 14-11-1. Схема установки сдвоенных диафрагм ($l = 0{,}5\ D$).

сужающих устройств для измерения расхода вязких веществ (мазута, масла, газов с большим содержанием водорода и т. д.). Кроме того, стандартные сужающие устройства не могут быть использованы для измерения расхода в трубопроводах малого диаметра ($D < 50$ мм). Поэтому является вполне естественным стремление создать такие формы сужающих устройств, которые обладали бы постоянством коэффициента расхода в указанной области чисел Рейнольдса.

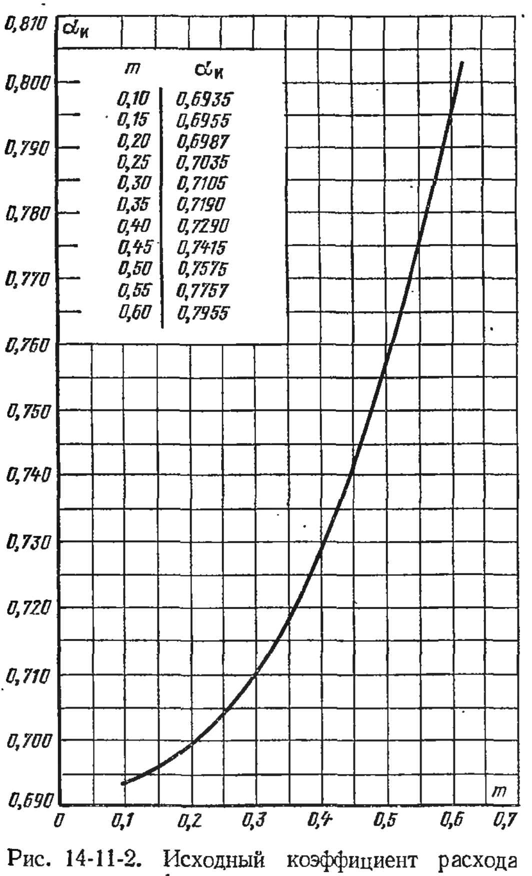


Рис. 14-11-2. Исходный коэффициент расхода сдвоенных диафрагм в зависимости от m основной диафрагмы.

Исследования показали, что снижение граничных значений чисел Рейнольдса, а вместе с тем обеспечение постоянства коэффициента расхода при малых и средних числах Рейнольдса могут быть достигнуты установкой перед основной диафрагмой второй дополнительной диафрагмы при определенном отношении диаметров основной и дополнительной диафрагм и при определенном расстоянии l между ними, обычно при $l = 0{,}5\,D$ (рис. 14-11-1). Отбор давления p_1 производится у передней плоскости дополнительной диафрагмы *1*, а отбор давления p_2 — у задней плоскости основной диафрагмы *2*. Дополнительная диафрагма является вспомогательным устройством, направляющим поток в основную диафрагму. При этом угол 2φ характеризует направляющее действие дополнительной диафрагмы и в значительной степени определяет характер движения потока через основную диафрагму. Угол φ для значений $m = 0{,}1 \div 0{,}6$, $l = 0{,}5\,D$ сохраняет почти постоянное значение $14 \pm 2°$. Вследствие этого, по-видимому, коэффициент сужения μ сдвоенных диафрагм остается практически постоянным ($0{,}70 \pm 0{,}01$) для всех значений m и превышает значения коэффициента сужения для стандартной

диафрагмы. В соответствии с этим у сдвоенных диафрагм больше и значения коэффициентов расхода по сравнению со стандартными диафрагмами. Значения $\alpha_и$ в зависимости от m основной диафрагмы приведены на рис. 14-11-2. Сдвоенные диафрагмы обладают постоянством коэффициентов расхода в достаточно широком интервале чисел Рейнольдса от $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^5$. По потере давления сдвоенная диафрагма занимает промежуточное место между стандартной диафрагмой и соплом (рис. 14-2-11).

Расчет диаметра d отверстия основной диафрагмы производится аналогично с стандартной диафрагмой (§ 14-9). При определении диаметра d отверстия основной диафрагмы коэффициент расхода для сдвоенных диафрагм находят по рис. 14-11-3 в зависимости от αm, где $m = d^2/D^2$. Диаметр d_1 отверстия дополнительной диафрагмы определяется по рис. 14-11-4 в зависимости от d/D основной диафрагмы при условии, что расстояние между ними $l = 0{,}5D$. Требования, предъявляемые к изготовлению основной и дополнительной диафрагм, а также кольцевых камер или отдельных отверстий для отбора давлений p_1 и p_2 остаются теми же, что и в случае стандартных диафрагм.

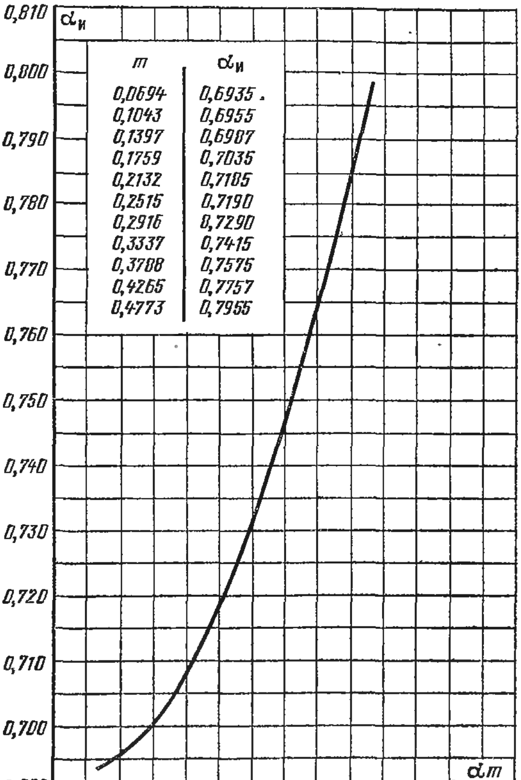


Рис. 14-11-3. Исходный коэффициент расхода сдвоенных диафрагм в зависимости от αm основной диафрагмы.

Следует отметить, что шероховатость трубопровода немного увеличивает коэффициент расхода сдвоенных диафрагм. Необходимые длины прямых участков труб перед сдвоенными диафрагмами приблизительно на 10% меньше, чем у стандартных диафрагм [70].

Кроме рассмотренных сдвоенных диафрагм имеются и другие типы сужающих устройств, которые подвергались исследованию с целью выявления их возможного использования для измерения расхода при малых числах Рейнольдса, а также в трубопроводах

небольшого диаметра. Наиболее известными из этого числа сужающих устройств являются сопла с профилем в четверть круга, сопла без цилиндрической части с профилем стандартного сопла, сопла с профилем полукруга и диафрагмы с двойным скосом.

Из числа перечисленных сужающих устройств большее внимание заслуживают сопла с профилем в четверть круга для измерения расхода при малых числах Рейнольдса, схематично показанные на рис. 14-11-5. У сопла при $m < 0,44$ (рис. 14-11-5,*а*) дуга его профиля плавно сопрягается с линией торца

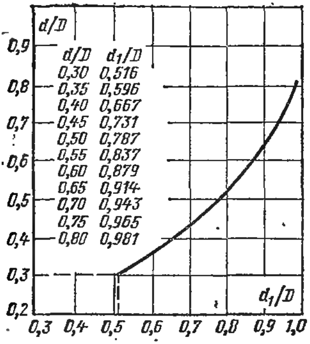


Рис. 14-11-4. График для определения d_1/D дополнительной диафрагмы в зависимости от d/D основной ($l = 0,5\ D$).

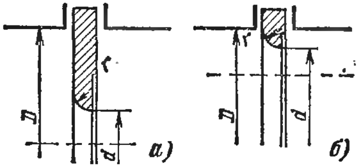


Рис. 14-11-5. Сопла с профилем в четверть круга.

на входе потока, а при $m \geqslant 0,44$ (рис. 14-11-5,*б*) дуга профиля получается срезанной, так как торец обтачивается до диаметра D.

Средние ориентировочные значения исходных коэффициентов расхода $\alpha_и$ этих сопл для определенных значений m, r и Re_D приведены в табл. 14-11-1.

Таблица 14-11-1

Основные характеристики сопл с профилем в четверть круга

Тип сопла по рис. 14-11-5	m	r/d	$\alpha_и$	Re_D от	Re_D до
а	0,05 0,16 0,25 0,36 0,39	0,100 0,112 0,135 0,208 0,285	0,771 0,792 0,830 0,903 0,933	700 650 330 300 370	56 000 140 000 240 000 270 000 150 000
б	0,44 0,49	0,377 0,446	0,974 1,012	250 200	200 000 200 000

Основные характеристики сужающих устройств, применяемых при малых числах Re_D

Тип сопла или диафрагмы по рис. 14-11-6	m		Re_D		Тип сопла или диафрагмы по рис. 14-11-6	m		Re_D	
	от	до	от	до		от	до	от	до
а	0,37	0,45	4000	100 000	*в*	0,16	0,25	3000	100 000
б	0,2	—	300	10 000	*г*	0,121	—	50	30 000

Немецкие нормы (ДИН 1952, 6-е издание) рекомендуют применять сопла с профилем в четверть круга (рис. 14-11-5,*а*) для измерения расхода в интервале чисел Рейнольдса Re_D от $5\cdot10^2$ до $2\cdot10^5$ при $m = 0{,}05 \div 0{,}5$.

На рис. 14-11-6 представлены другие типы сужающих устройств для измерения расхода при малых числах Рейнольдса. Область граничных чисел Рейнольдса и значений m для этих сужающих устройств приведены в табл. 14-11-2. При изготовлении их необходимо руководствоваться основными размерами, указанными на рис. 14-11-6.

В отношении условий установки и производства измерений с помощью рассмотренных сужающих устройств должны соблюдаться те же меры предосторожности, что и для стандартных сужающих устройств.

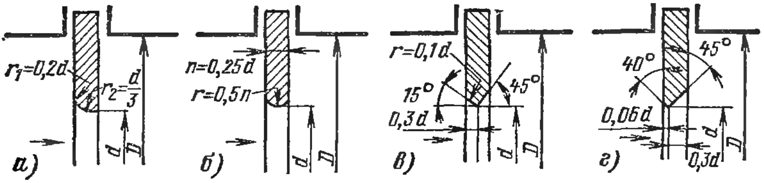


Рис. 14-11-6. Сужающие устройства для измерения расхода при малых числах Рейнольдса.

а — сопло без цилиндрической части; *б* — сопло с профилем полукруга; *в* — диафрагма с двойным скосом; *г* — диафрагма с двойным скосом.

Согласно указаниям Правил 27-54 сужающие устройства, рассмотренные в настоящем параграфе, необходимо подвергать индивидуальной градуировке в пределах тех чисел Рейнольдса, при которых они будут применяться.

14-12. Измерение расхода загрязненных жидкостей и газов

Для измерения расхода загрязненной жидкости, влажного или содержащего пыль газа находят применение сегментные диафрагмы и в меньшей степени диафрагмы с круглым отверстием, эксцентричным оси трубопровода. Сегментные диафрагмы широко применяют в Англии, ФРГ, США и других странах. Эти диафрагмы более удобны, чем нормальные сужающие устройства, для измерения расхода загрязненных жидкостей и газов в горизонтальных и наклонных трубопроводах, так как через них беспрепятственно могут проходить примеси, содержащиеся в потоке, и поэтому исключается образование осадков и отложений перед диафрагмой.

Сегментная диафрагма, показанная на рис. 14-12-1, представляет собой тонкий диск, имеющий отверстие в виде сегмента.

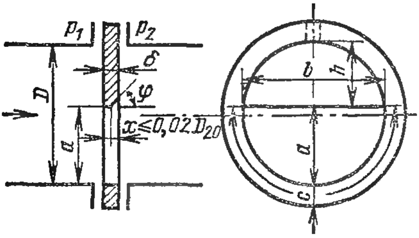


Рис. 14-12-1. Сегментная диафрагма.

a — высота сегментного отверстия; *b* — хорда сегмента; *c* — длина дуги сегментного отверстия; *h* — высота сегмента ($h = D - a$).

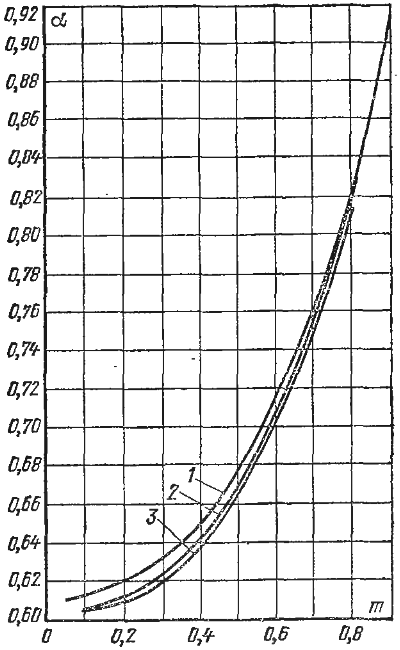


Рис. 14-12-2. Коэффициенты расхода сегментных диафрагм в зависимости от *m*.

1 — по Ломану; *2* — по Херингу и Лугту; *3* — по Витте.

Прямоугольная кромка диафрагмы со стороны входа потока должна быть острой. Угол конусности φ со стороны выхода потока делают равным 35—45°. Отбор давлений p_1 и p_2 до и после сегментной диафрагмы производят в верхней части ее со стороны, противоположной отверстию истечения. При выборе толщины диска δ сегментной диафрагмы, а также диаметра отверстий для отборов давления рекомендуется руководствоваться указаниями для стандартных диафрагм, изложенными выше. Требования к проточной части сегментных диафрагм те же, что и для стандартных диафрагм.

Исходные коэффициенты расхода сегментных диафрагм определялись экспериментально на трубопроводах диаметром от 80 до

Таблица 14-12-1

Значения α, $m\alpha$ и $Re_{D_{гр}}$ в зависимости от m для сегментных диафрагм при угловом способе отбора давлений

m	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
α	0,606	0,610	0,613	0,626	0,645	0,674	0,711	0,756	0,821	0,917
$m\alpha$	0,0303	0,0610	0,1230	0,1878	0,2580	0,3370	0,4266	0,5292	0,6568	0,8253
$Re_{D_{гр}}$	$5\cdot10^3$	$10\cdot10^3$	$23\cdot10^3$	$40\cdot10^3$	$70\cdot10^3$	$120\cdot10^3$	$180\cdot10^3$	$250\cdot10^3$	$300\cdot10^3$	$370\cdot10^3$

304 мм. Результаты этих исследований опубликованы в ряде работ [71, 72]. Приведенные в этих работах значения коэффициентов расхода при угловом способе отбора давлений расходятся между собой не более чем на 1% (рис. 14-12-2). В табл. 14-12-1 по данным указанных работ приведены средние значения коэффициентов расхода сегментных диафрагм в зависимости от m. В этой таблице приведены также значения $m\alpha$ и граничные числа Рейнольдса $Re_{D_{гр}}$. Значения коэффициентов расхода сегментных диафрагм немного меньше, чем у стандартных диафрагм. Поправочные множители к коэффициентам расхода сегментных диафрагм на неостроту входной кромки для $m \geqslant 0,3$ имеют примерно такие же значения, как и у стандартных диафрагм, имеющих одинаковые m. При модуле $m > 0,3$ сегментные диафрагмы менее чувствительны к неостроте входной кромки по сравнению со стандартными диафрагмами [72]. Значения поправочных множителей ε при измерении расхода газов могут быть определены по номограммам (см. рис. П14-4-1 и П14-4-2).

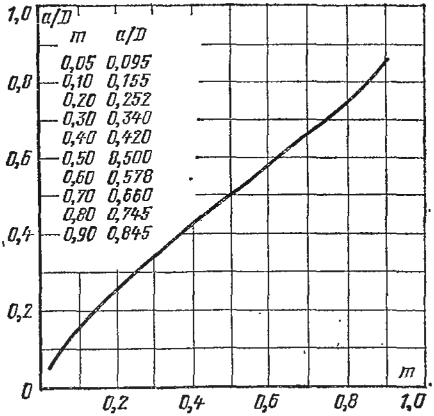


Рис. 14-12-3. Зависимость отношения a/D от m для сегментной диафрагмы.

Для определения расхода с помощью сегментных диафрагм можно пользоваться формулами (14-1-19) и (14-1-20). При этом площадь отверстия F_0 сегментной диафрагмы определяется по формуле

$$F_0 = mF_1 = m\frac{\pi D^2}{4} \tag{14-12-1}$$

или

$$F_0 = \frac{D(c-b)+2ba}{4}. \tag{14-12-2}$$

Обозначения в формулах соответствуют принятым на рис. 14-12-1. Длина окружности c и хорда b зависят от соотношения a/D. Выражая значения хорды и длины дуг через a и D, после преобразований получим:

$$F_0=\frac{D^2}{4}\arccos\left(1-2\frac{a}{D}\right)-2\left(\frac{D}{2}\right)^2\left(1-2\frac{a}{D}\right)\sqrt{\frac{a}{D}-\left(\frac{a}{D}\right)^2}.$$

Подставляя в это выражение значение F_0 из (14-12-1), имеем:

$$m=\frac{1}{\pi}\left[\arccos\left(1-2\frac{a}{D}\right)-2\left(1-2\frac{a}{D}\right)\sqrt{\frac{a}{D}-\left(\frac{a}{D}\right)^2}\right]. \quad (14\text{-}12\text{-}3)$$

Это уравнение дает возможность определить зависимость m от a/D, приведенную на рис. 14-12-3.

Потеря давления $p_п$ для сегментных диафрагм близка к соответствующим значениям у стандартным диафрагм.

14-13. Измерение расхода при сверхкритическом отношении давлений

Для измерения расхода пара или газа при сверхкритическом отношении давлений применяют стандартное сопло. Рассмотрим, как изменяется расход пара или газа через сопло в зависимости от изменения p_2/p_1. При этом будем полагать, что давление p_1 перед соплом остается неизменным, а p_2 за соплом принимает различные значения. Как видно из графика, приведенного на рис. 14-13-1, при уменьшении отношения p_2/p_1 вследствие увеличения перепада давления ($\Delta p = p_1 - p_2$), расход Q увеличивается и при значении p_2/p_1, несколько большем половины, достигает максимума $Q_{макс}$. При дальнейшем увеличении перепада давления или понижении давления p_2, а вместе с тем и отношения p_2/p_1 расход не изменяется и остается постоянным.

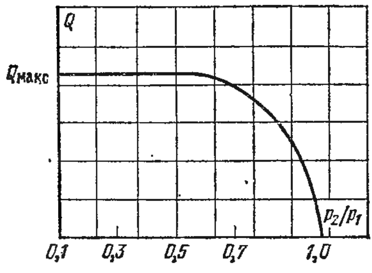


Рис. 14-13-1. Изменение расхода через сопло в зависимости от P_2/P_1.

Отношение давлений, при котором расход пара или газа через сопло становится максимальным, носит название критического отношения и обозначается $p_{2кр}/p_1$, а давление p_2, соответствующее ему, называется критическим давлением. Скорость среды, соответствующую $p_{2кр}$, а вместе с тем $Q_{макс}$ называют критической скоростью, которая равна скорости звука в этой среде.

Это явление можно объяснить следующим образом. При понижении давления от p_1 до $p_{2кр}$ давление p_2 за соплом создает равное ему давление в начале цилиндрической части сопла, т. е. понижение давления p_2 обусловливает понижение давления в начале цилиндри-

ческой части сопла и вследствие этого расход возрастает. При этом расход Q увеличивается до тех пор, пока давление в начале цилиндрической части сопла не примет некоторого вполне определенного для данного случая значения $p_{2кр}$. Понижение давления p_2 среды за соплом ниже $p_{2кр}$ не вызывает уменьшения давления в начале цилиндрической части сопла, и оно остается равным $p_{2кр}$. Сечение цилиндрической части, в котором давление p_2 принимает критическое значение

$$p_{2кр} = p_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

называется критическим сечением сопла.

Уравнения (14-1-19) и (14-1-20) могут быть использованы и для определения расхода пара или газа при сверхкритическом отношении давлений, если подразумевать в них под давлением p_2 критическое давление $p_{2кр}$. Подставляя в уравнения (14-1-19) и (14-1-20) значение $p_2 = p_{2кр}$, получаем после соответствующих преобразований:

$$Q_м = 1{,}252 \cdot 10^{-2} cd^2 \sqrt{\rho p_1}; \qquad (14\text{-}13\text{-}1)$$

$$Q_о = 1{,}252 \cdot 10^{-2} cd^2 \sqrt{\frac{p_1}{\rho}}, \qquad (14\text{-}13\text{-}2)$$

где c — приведенный коэффициент, равный:

$$c = \alpha\varepsilon \sqrt{1 - \frac{p_{2\,кр}}{p_1}};$$

p_1 — абсолютное давление перед соплом, кгс/см^2.

Значения критического отношения давлений для стандартного сопла в зависимости от показателя адиабаты k и m приведены в табл. 14-13-1.

Таблица 14-13-1

Значения критического отношения давлений $p_{2кр}/p_1$ для стандартного сопла

m	$k = 1{,}31$	$k = 1{,}41$	m	$k = 1{,}31$	$k = 1{,}41$
0	0,544	0,527	0,4	0,565	0,548
0,2	0,549	0,532	0,6	0,598	0,581

На рис. 14-13-2 приведены значения безразмерного коэффициента c для $k = 1{,}31$ в зависимости от p_2/p_1. Этот график показывает, что коэффициент c вначале увеличивается и при значении p_2/p_1, несколько большем половины, достигает своего максимума. При дальнейшем понижении отношения p_2/p_1 коэффициент c не изменяется.

При $m \leqslant 0{,}4$ и $0 < p_2/p_1 \leqslant p_{2кр}/p_1$, как видно из рис. 14-13-2, значение $c = 0{,}468$. Подставив это значение c в уравнение (14-13-1), получим формулу для определения расхода перегретого пара, кг/ч,

при сверхкритическом отношении давлений:

$$Q_м = 5{,}859 \cdot 10^{-3} d^2 \sqrt{\rho p_1}. \qquad (14\text{-}13\text{-}3)$$

При $m \leqslant 0{,}4$ и $0 < p_2/p_1 \leqslant p_{2кр}/p_1$ значение $c = 0{,}481$ для $k = 1{,}41$. Подставив в уравнение (14-13-2) значение $c = 0{,}481$, получим формулу для определения расхода газа, м³/ч:

$$Q_о = 6{,}022 \cdot 10^{-3} d \sqrt{\frac{p_1}{\rho}}. \qquad (14\text{-}13\text{-}4)$$

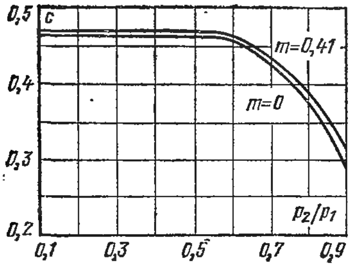


Рис. 14-13-2. Приведенный коэффициент c нормального сопла для $k = 1{,}31$.

Таким образом, при измерении расхода перегретого пара или газа следует различать два случая измерения.

Первый случай $1 > p_2/p_1 > p_{2кр}/p_1$, когда расход пара или газа определяется по формулам (14-1-19) и (14-1-20). В этом случае необходимо знать перепад давления в стандартном сопле и плотность пара или газа перед сужающим устройством.

Второй случай $0 < p_2/p_1 \leqslant p_{2кр}/p_1$, когда расход пара или газа при $m \leqslant 0{,}4$ определяют по формулам (14-13-3) и (14-13-4). Для этого случая необходимо знать давление и плотность пара или газа перед стандартным соплом.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ НАПОРНЫМИ ТРУБКАМИ

15-1. Общие сведения о методе измерения скоростей потока

Напорные трубки применяют для измерения скорости и давления в потоках, а также для измерения скоростей в пограничных слоях при экспериментальных исследованиях как в лабораторных, так и в производственных условиях. Они используются также для измерения расхода жидкостей и газов при исследованиях, испытаниях и в ряде других случаев. Специальные напорные трубки применяют, кроме того, для измерения скорости полета летающих аппаратов (точнее, скорости относительно воздушной среды).

Измерение скорости в потоке жидкости или газа напорными трубками сводится к измерению динамического давления (скоростного напора), которое равно разности полного и статического давлений и связано со скоростью соотношением, получаемым из уравнения Бернулли

$$p_п - p_с = \frac{\rho v^2}{2}, \qquad (15\text{-}1\text{-}1)$$

откуда скорость невозмущенного потока в точке измерения равна:

$$v=\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_п-p_с)}, \qquad (15\text{-}1\text{-}2)$$

где v — скорость движения газа или жидкости, м/с; ρ — плотность жидкости или газа в рабочих условиях, кг/м³; $p_п$ — полное давление в лобовой точке напорной трубки, называемой критической, Па; $p_с$ — статическое давление или так называемое гидродинамическое давление в невозмущенном потоке, Па.

Таким образом, для определения динамического давления $\rho v^2/2$, а следовательно, и скорости в данной точке потока необходимо измерить разность полного и статического давлений. Измерение полного давления может быть осуществлено напорной трубкой с отверстием на лобовом ее конце (в критической точке), установленной навстречу движению потока, а статическое давление — через одно или несколько отверстий в стенке трубы (рис. 15-1-1). Так как для определения скорости в данной точке потока нужно измерить только разность давлений $p_п - p_с$, то обе трубки следует присоединить к микроманометру или жидкостному дифманометру. В уравнение (15-1-2) входит плотность среды, которую необходимо определить для рабочих условий с максимально возможной точностью (§ 14-5).

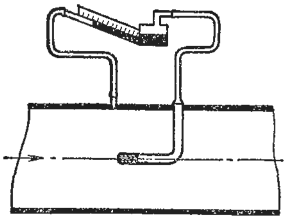


Рис. 15-1-1. Измерение динамического давления.

При измерении динамического давления микроманометром или дифманометром, в которых мерой значений $p_п - p_с$ является разность уровней рабочей жидкости, необходимо учитывать не только плотность последней, но также плотность среды, находящейся над рабочей жидкостью (гл. 9).

Рассмотренный метод впервые был применен в 1732 г. Пито для измерения скорости в потоке воды, поэтому напорную трубку, схематично показанную на рис. 15-2-1, называют трубкой Пито.

Дальнейшее развитие этого метода измерения скоростей потока шло по пути создания комбинированных напорных трубок, снабженных отверстиями для приема как полного, так и статического давлений. В настоящее время применяют ряд конструкций напорных трубок, приспособленных как для лабораторных, так и для промышленных измерений скоростей потока. Необходимо иметь в виду, что как бы удачна ни была конструкция трубки, динамическое давление измеряется не вполне точно. Поэтому в правую часть формулы (15-1-2) вводят поправочный коэффициент. Если обозначить этот коэффициент через ξ, то

$$v=\xi\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_п-p_с)}. \qquad (15\text{-}1\text{-}3)$$

Коэффициент ξ, определяемый посредством градуировки, различен для разных конструкций трубок.

Формула (15-1-2) получена в предположении, что жидкость несжимаема и применима для капельных жидкостей и для газа при небольших скоростях ($M = v/a < 0{,}2$, здесь a — скорость звука в данной среде). При более высоких скоростях среды, но не превышающих скорости звука, v определяется по формуле [1]

$$v = \sqrt{2TR\frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_{п}}{p_{с}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}, \qquad (15\text{-}1\text{-}4)$$

где T — термодинамическая температура газа, определяемая по формуле (6-5-10); R — газовая постоянная; $k = c_p/c_v$ — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме.

15-2. Устройство напорных трубок

Из числа существующих напорных трубок широко применяется как в лабораторных, так и в промышленных условиях дифференциальная трубка Пито с полусферической головкой наконечника, снабженная державкой (рис. 15-2-1). В этой трубке полное давление потока передается через отверстие на лобовом конце наконечника трубки, статическое — через узкую прерывистую щель на поверхности наконечника. По каналам в теле цилиндрического наконечника и в державке трубки давления передаются к прибору, измеряющему разность $p_{п} - p_{с}$.

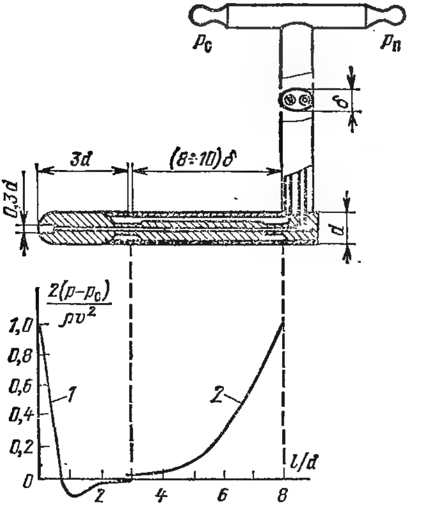


Рис. 15-2-1. Дифференциальная трубка Пито.

На рис. 15-2-1 приведены также кривые, характеризующие распределение давлений по поверхности наконечника (цилиндрического участка) трубки с учетом влияния, оказываемого державкой (трубка, перпендикулярная к наконечнику). На оси ординат отложено отношение $\frac{2(p - p_с)}{\rho v^2}$, где p — давление в данной точке поверхности наконечника трубки; $p_с$ — статическое давление в невозмущенном потоке.

[1] Вывод уравнения (15-1-4) см. в [73].

На оси абсцисс отложено отношение l/d, здесь l — расстояние данной точки поверхности наконечника трубки от начала координат; d — наружный диаметр наконечника трубки.

Кривая *1* характеризует распределение давлений вдоль образующей наконечника трубки без учета влияния, оказываемого державкой. Кривая *2* характеризует распределение давлений, обусловленных влиянием державки.

В лобовой точке наконечника, называемой критической, $\frac{2(p-p_c)}{\rho v^2} = 1$, что и обусловливает выполнение отверстия в этой точке для измерения полного давления.

На поверхности наконечника трубки имеется область, отвечающая отношению $l/d = 3$, для которой с достаточной степенью приближения можно принять $p = p_c$. Это является обоснованием к выбору места щели на поверх-

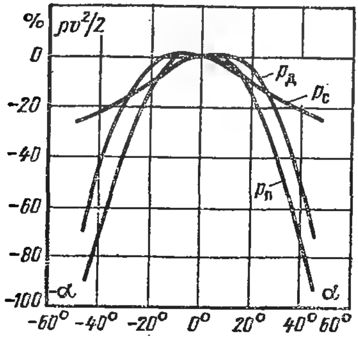


Рис. 15-2-2. Влияние отклонения напорной трубки на $p_п$, p_c и $p_д$.

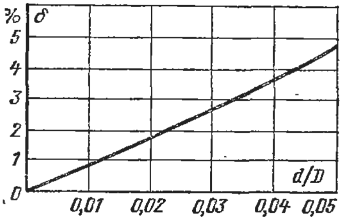


Рис. 15-2-3. Возможная погрешность при определении средней скорости в зависимости от d/D.

ности наконечника трубки для измерения статического давления. Для измерения статического давления на поверхности цилиндрического участка трубки иногда вместо щели делают отверстия. При изготовлении дифференциальной трубки необходимо строго соблюдать форму и размеры, приведенные на рис. 15-2-1.

Для дифференциальных трубок при $\mathrm{Re}_d = \frac{vd}{\nu} > 700$ поправочный коэффициент ξ близок к единице в пределах около 1%. При $\mathrm{Re}_d < 700$ коэффициентов ξ быстро падает и при $\mathrm{Re}_d \approx 300$ отличается от единицы примерно на 6% [73].

Особенностью напорной трубки является ее нечувствительность к малым отклонениям оси наконечника от направления набегающего потока. На рис. 15-2-2 показано изменение полного, статического и динамического давлений, воспринимаемых трубкой при изменении угла α между осью наконечника и направлением потока. Из графиков видно, что при малых углах отклонения оси наконечника трубки от направления потока полное и статическое давления изменяются почти одинаково, так что их разность (динамическое

давление $p_д$) остается практически постоянной вплоть до значений угла $\alpha = 16°$.

При применении дифференциальной трубки необходимо учитывать, что трубка с большим диаметром d наконечника может вызвать изменение распределения скоростей в потоке в том месте, где производится измерение. На рис. 15-2-3 представлен график, построенный по данным Никурадзе, дающий представление о возможных значениях относительной погрешности измерения средней скорости потока в трубах при помощи трубки в зависимости от отношения диаметра наконечника трубки d к диаметру трубы D. Поскольку дифференциальную трубку малых размеров достаточно точно изготовить затруднительно, то для измерения скоростей в трубах небольшого диаметра, а также в пограничных слоях применяют трубки Пито (рис. 15-1-1) с диаметром наконечника 0,5—1 мм. В этом случае статическое давление измеряют через отверстие в стенке труб.

При определении скорости от 5 до 25 м/с измеряемое динамическое давление с помощью трубок невелико, например, для потока воздуха, находящегося под давлением, близком к атмосферному, лежит в пределах от 1,6 до 40 кгс/м^2 (16—400 Па). Вследствие трудностей, встречающихся при измерении малых скоростей газового потока с помощью напорных трубок и жидкостных манометров, для этой цели применяют также другие приборы — анемометры и термоанемометры.

Наряду с описанными выше нормальными трубками широко применяют для измерения скоростей в потоках напорные трубки и других конструкций [59, 74].

15-3. Определение средней скорости потока и расхода

Скорость потока в различных точках его сечения неодинакова. В трубопроводе она достигает максимального значения в центральной части сечения и уменьшается по направлению к стенкам.

Для определения расхода необходимо знать среднюю скорость потока, т. е. скорость, которая, будучи умножена на площадь сечения трубопровода и плотность измеряемой среды, дает количество вещества, протекающего через трубопровод в единицу времени. Скорость, измеренная с помощью напорной трубки, соответствует местной скорости потока в той точке, где установлена трубка. Поэтому для определения средней скорости потока сечения трубопровода разбивают на n участков с равными площадями и измеряют скорость в определенной точке каждого участка. При этом приблизительно принимают, что во всех точках участка скорость постоянна и равна измеряемой.

Обозначая скорости на каждом участке через $v_1, v_2, \ldots, v_n$ (м/с), соответствующие им динамические давления через Δp_1, Δp_2, ..., Δp_n (Па), площадь сечения трубопровода при рабочей температуре

через F (м²), расход в единицах массы $Q_м$ (кг/с), будем иметь:

$$Q_м = \frac{F\rho}{n}(v_1 + v_2 + \ldots + v_n). \qquad (15\text{-}3\text{-}1)$$

С другой стороны, по определению средней скорости

$$Q_м = \rho F v_{ср}. \qquad (15\text{-}3\text{-}2)$$

Исключив из уравнения (15-3-1) и (15-3-2) $Q_м$, получим:

$$v_{ср} = \frac{1}{n}(v_1 + v_2 + \ldots + v_n). \qquad (15\text{-}3\text{-}3)$$

Пользуясь уравнением (15-1-3) и (15-3-3), находим для средней скорости выражение

$$v_{ср} = \xi \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p_{ср}}, \qquad (15\text{-}3\text{-}4)$$

где

$$\sqrt{\Delta p_{ср}} = \frac{1}{n}\sqrt{\Delta p_1 + \Delta p_2 + \ldots + \Delta p_n}. \qquad (15\text{-}3\text{-}5)$$

Здесь $\Delta p_{ср}$ — динамическое давление, Па, соответствующее средней скорости.

Определив среднюю скорость, можно найти количество вещества, кг/с, протекающего через трубопрвод в единицу времени:

$$Q_м = \rho F v_{ср} = \xi F \sqrt{2\rho\,\Delta p_{ср}}. \qquad (15\text{-}3\text{-}6)$$

Расход в единицах объема вычисляется по формуле

$$Q_о = \xi F \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p_{ср}}. \qquad (15\text{-}3\text{-}7)$$

Способ измерения средней скорости при помощи напорных трубок наряду с многими положительными качествами имеет и ряд недостатков: он требует больших затрат времени и большой счетной работы, а также применения весьма точных приборов для измерения динамического давления.

Для изучения газовых потоков с быстро изменяющимися скоростями и давлениями применяют термоанемометры, так как напорные трубки, обладающие значительной инерционностью, для этих целей непригодны.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

16-1. Общие сведения

Расходомеры постоянного перепада давления относятся к средствам измерений, называемым расходомерами обтекания. Они основаны на измерении вертикального перемещения чувствитель-

ного элемента (тела), зависящего от расхода среды и приводящего одновременно к изменению площади проходного отверстия расходомера таким образом, что разность давлений на чувствительный элемент (перепад давления) остается практически постоянной. Противодействующей силой в расходомерах этого вида является сила тяжести чувствительного элемента, выполняемого в виде поплавка или поршня.

К приборам постоянного перепада давления относятся ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры.

Ротаметры, широко применяемые в лабораторных и промышленных условиях, предназначены для измерения плавно меняющегося объемного расхода однородных потоков чистых и слабозагрязненных жидкостей и газов с дисперсными включениями инородных частиц (ГОСТ 13045-67). Они применяются также в качестве индикаторов расхода среды в газоанализаторах и других приборах. На ТЭС ротаметры в качестве расходомеров не применяются.

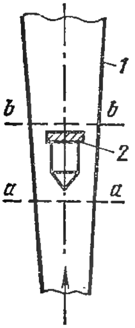


Рис. 16-1-1. Схема ротаметра.

Ротаметр (рис. 16-1-1) в простейшем виде состоит из вертикальной конусной стеклянной трубки *1*, внутри которой находится чувствительный элемент *2*, выполненный в виде поплавка. Для обеспечения устойчивой работы поплавка верхний его обод снабжен каналами с крутым наклоном. Под действием потока жидкости или газа поплавок вертикально перемещается и одновременно приходит во вращательное движение и центрируется в середине потока. По перемещению поплавка ротаметра вдоль его шкалы, нанесенной на конусной стеклянной трубке (на рис. 16-1-1 шкала не показана), судят об объемном расходе в единицу времени (л/ч, м^3/ч). Имеются ротаметры, у которых поплавок не совершает вращательного движения, а корпус их выполнен из металла.

В приборе, называемом поршневым расходомером (рис. 16-1-2, *а*), чувствительным элементом является поршень *1*, находящийся внутри втулки *2*. Эта втулка имеет круглое входное отверстие *6* и прямоугольное выходное отверстие *5*. Выходное отверстие является своего рода диафрагмой переменного сечения. Размеры его подбираются в зависимости от пропускной способности расходомера. Сила тяжести поршня регулируется в зависимости от верхнего предела измерения с помощью дополнительных грузов *4*. Поршень с помощью штока соединен с сердечником передающего преобразователя *3*. Протекающая через входное отверстие жидкость поступает непосредственно под поршень и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, открывает в большей или меньшей степени отверстие выходной диафрагмы. Протекающая через диафрагму жидкость одновременно заполняет надпоршневое пространство, которое соединено с каналом за диафрагмой. Прямоугольная форма

выходного отверстия обеспечивает линейную зависимость между подъемом поршня и расходом вещества.

Поплавковый расходомер постоянного перепада давления (рис. 16-1-2, *б*) состоит из чувствительного элемента *1*, выполненного в виде поплавка, и конического седла *2*, расположенного в корпусе прибора. Отсчетное устройство на схеме расходомера

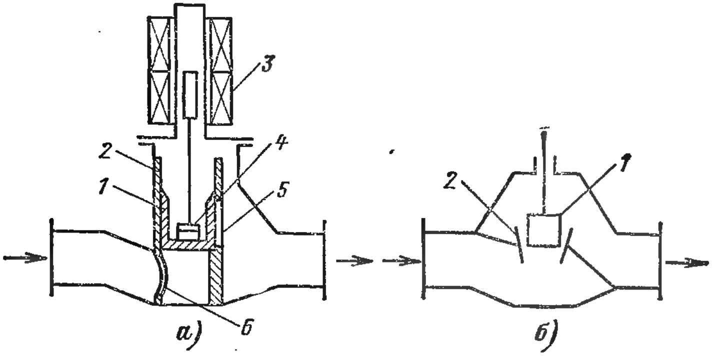


Рис. 16-1-2. Схемы поршневого (*а*) и поплавкового (*б*) расходомеров.

не показано. В расходомерах этого типа коническое седло выполняет ту же роль, что и коническая трубка у ротаметра. Различие заключается лишь в том, что длина и диаметр седла примерно равны, в то время как у ротаметра длина конической трубки значительно больше ее диаметра. Имеются и другие разновидности расходомеров обтекания [59]. Следует отметить, что поршневые и поплавковые расходомеры (рис. 16-1-2) широкого распространения не получили.

16-2. Основы теории ротаметров

Поток жидкости или газа, протекающий снизу вверх в конусной трубке ротаметра (рис. 16-1-1), поднимает поплавок до тех пор, пока площадь кольцевого отверстия $F_к$ между поплавком и внутренней поверхностью конусной трубки не достигнет такого размера, при котором действующие на поплавок силы уравновешиваются. При достижении равновесия сил поплавок устанавливается на высоте, соответствующей определенному значению расхода.

На носовую часть поплавка снизу вверх действуют две силы: сила от давления потока $q = p'_1 F_п$ и сила трения потока о поплавок $q_т = kv^n_{ср} F_{б.п}$. Сверху вниз на поплавок действуют также две силы: сила тяжести поплавка $q_п = V_п \rho_п g$ и сила от давления потока $q_2 = p'_2 F_п$. Здесь p'_1 и p'_2 — среднее давление потока на единицу носовой и верхней поверхностей поплавка соответственно; $F_п$ — площадь наибольшего поперечного сечения поплавка; k —

коэффициент сопротивления, зависящий от степени шероховатости поверхности и числа Рейнольдса; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость потока в кольцевом отверстии $F_{\text{к}}$; n — показатель, зависящий от размера скорости $v_{\text{ср}}$; $F_{\text{б.п}}$ — площадь боковой поверхности поплавка; $v_{\text{п}}$ — объем поплавка; g — ускорение свободного падения; $\rho_{\text{п}}$ — плотность материала поплавка.

Условие равновесия поплавка определяется выражением

$$p_1' F_{\text{п}} + \kappa v_{\text{ср}}^n F_{\text{б. п}} = p_2' F_{\text{п}} + V_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g,$$

откуда находим разность средних давлений на носовую и верхнюю поверхности поплавка:

$$p_1' - p_2' = \frac{1}{F_{\text{п}}} \left(V_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g - \kappa v_{\text{ср}}^n F_{\text{б. п}} \right). \qquad (16\text{-}2\text{-}1)$$

Так как с увеличением расхода площадь кольцевого отверстия $F_{\text{к}}$ увеличивается, то можно допустить, что скорость $v_{\text{ср}}$ при всех расходах остается постоянной, правая часть выражения (16-2-1) не зависит от значения расхода и для данного прибора остается постоянной. Из сказанного следует, что $p_1' - p_2' = \text{const}$, что и дает основание ротаметр называть расходомером постоянного перепада давления.

Разность статических давлений $p_1 - p_2$, действующих на поплавок с учетом гидростатического давления, не является постоянной. На значение этой разности давлений влияет сила от динамического давления потока

$$q_{\text{ц}} = \varphi F_{\text{п}} \frac{\rho v_a^2}{2}, \qquad (16\text{-}2\text{-}2)$$

где φ — коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от его формы; ρ — плотность жидкости (газа), протекающей через ротаметр; v_a — средняя скорость потока в сечении $a - a$ (рис. 16-1-1).

С учетом выражения (16-2-2) и уравнения (16-2-1) имеем:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{F_{\text{п}}} \left(V_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g - \kappa v_{\text{ср}}^n F_{\text{б. п}} - \varphi F_{\text{п}} \frac{\rho v_a^2}{2} \right). \qquad (16\text{-}2\text{-}3)$$

Из этого уравнения следует, что с увеличением расхода, а следовательно, и скорости v_a значение перепада давления на поплавке $p_1 - p_2$ убывает. Полный же перепад давления на ротаметре с ростом расхода будет увеличиваться. Это обусловливается ростом потери давления с увеличением расхода жидкости, протекающей через ротаметр. Для промышленных ротаметров потери давления от установки ротаметра в линии обычно не превышают 0,1 кгс/см^2 для жидкостей и 0,05 кгс/см^2 для газов.

Для вывода уравнения расхода среды, протекающей через ротаметр, воспользуемся уравнением Бернулли для сечений $a - a$ и $b - b$ (рис. 16-1-1):

$$\frac{p_a}{\rho g} + \frac{\kappa_a v_a^2}{2g} + l_a = \frac{p_b}{\rho g} + \frac{\kappa_b v_b^2}{2g} + l_b + \xi \frac{v_b^2}{2g}, \qquad (16\text{-}2\text{-}4)$$

где p_a — среднее статическое давление в сечении $a — a$, начиная с которого сказывается возмущающее воздействие поплавка на поток; p_b — среднее статическое давление в сечении $b — b$, проходящем в самом узком месте струи после прохода ее через кольцевое отверстие $F_к$; v_b — средняя скорость потока в сечении $b — b$; κ_a и κ_b — коэффициенты неравномерности распределения скорости в сечениях $a — a$ и $b — b$ соответственно; l_a и l_b — высоты сечений $a — a$ и $b — b$ над некоторым начальным уровнем; ξ — коэффициент потери энергии на участке между сечениями $a — a$ и $b — b$.

Остальные обозначения соответствуют принятым выше.

Согласно условию неразрывности струи для несжимаемой жидкости для сечений $a — a$ и $b — b$ справедливо равенство

$$Q_o = v_a F_a = v_b F_b = v_b \mu F_к,$$

где Q_o — объемный расход жидкости; F_a и F_b — площадь потока в сечениях $a — a$ и $b — b$; $\mu = F_b/F_к$ — коэффициент сужения.

Из уравнения (16-2-4), учитывая условие неразрывности струи, получаем:

$$\frac{2(p_a - p_b)}{\rho} - 2g(l_b - l_a) = \frac{Q_o^2}{\mu^2 F_к^2}\left[\kappa_b + \xi - \kappa_a \mu^2 \left(\frac{F_к}{F_a}\right)^2\right]$$

или

$$\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} - 2gl = \frac{Q_o^2}{\psi \mu^2 F_к^2}\left[\kappa_b + \xi - \kappa_a \mu^2 \left(\frac{F_к}{F_a}\right)^2\right], \qquad (16\text{-}2\text{-}5)$$

где

$$\psi = \frac{p_a - p_b}{p_1 - p_2}; \quad l \approx l_b - l_a.$$

Подставляя в уравнение (16-2-5) значение $p_1 - p_2$ по уравнению (16-2-3) и решая его относительно Q_o находим:

$$Q_o = \alpha F_к \sqrt{\frac{2gV_п(\rho_п - \rho)}{\rho F_п}}, \qquad (16\text{-}2\text{-}6)$$

где

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\kappa_b + \xi - \kappa_a \mu^2 \left(\frac{F_к}{F_a}\right)^2}} \sqrt{\frac{g(V_п \rho_п - F_п l \rho) - q_т - q_д}{gV_п(\rho_п - \rho)}}.$$

Уравнение расхода (16-2-6) показывает, что расход среды, протекающей через ротаметр, зависит от двух переменных α и $F_к$. При этом коэффициент расхода α, как видно из приведенных выражений, зависит от большого числа величин и, кроме того, от геометрической формы поплавка [59].

Для экспериментальной градуировки ротаметров, предназначенных для измерений расхода жидкостей или газов, применяют в качестве градуировочной среды воду и воздух (ГОСТ 13045-67). В инструкциях по монтажу и эксплуатации ротаметров обычно приводится методика для пересчета показаний ротаметра на измеряемую среду с учетом плотности и вязкости.

16-3. Устройство ротаметров

Ротаметры, применяемые для измерения объемного расхода жидкостей и газов, имеют несколько разновидностей [75].

Ротаметры, применяемые для местного измерения расхода, изготовляются со стеклянной конусной трубкой в виде показывающих приборов. Ротаметры, имеющие металлический корпус, снабжаются передающими измерительными преобразователями с электрическим или пневматическим выходным сигналом. Эти ротаметры работают в комплекте с вторичными приборами. Ротаметры с металлическим корпусом близки по своему устройству к поплавковым расходомерам.

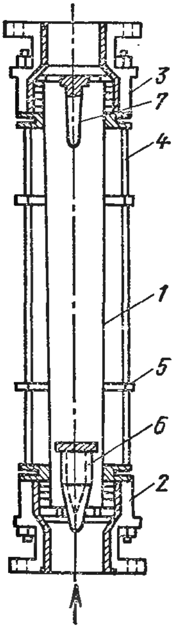


Рис. 16-3-1. Ротаметры со стеклянной конусной трубкой.

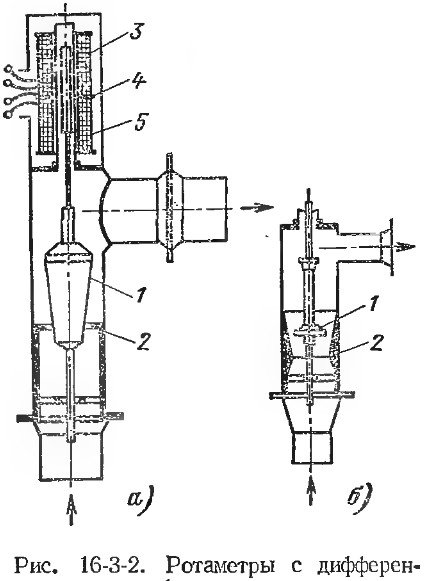


Рис. 16-3-2. Ротаметры с дифференциально-трансформаторным передающим преобразователем.

а — с коническим поплавком; *б* — с грибообразным поплавком.

Ротаметры указанных разновидностей выпускаются классов точности: 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 (ГОСТ 13045-67).

На рис. 16-3-1 показано устройство ротаметра со стеклянной конусной трубкой *1*, которая зажата в патрубках *2* и *3*, снабженных сальниками. Оба патрубка между собой связаны тягами *4* с надетыми на них ребрами *5*. Эта армировка придает прибору необходимую прочность. Внутри патрубка *2* имеется седло, на которое опускается поплавок *6* при нулевом расходе жидкости или газа. Верхний патрубок *3* снабжен ограничителем хода поплавка *7*. Шкала наносится непосредственно на внешней поверхности стек-

лянной конусной трубки. Указателем у ротаметров со стеклянной трубой служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка.

Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 6 кгс/см^2 (0,6 МПа).

Ротаметры, снабженные передающими преобразователями с электрическим выходным сигналом, показаны на рис. 16-3-2. Ротаметр, показанный на рис. 16-3-2, *а*, имеет конический поплавок *1*, который перемещается внутри кольцевой диафрагмы *2* под действием проходящего снизу вверх потока жидкости. При подъеме поплавка проходное отверстие между рабочей поверхностью поплавка и внутренней кромкой диафрагмы увеличивается пропорционально изменению расхода среды.

Поплавок ротаметра жестко связан с сердечником *3* передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя *4*. Катушка дифференциально-трансформаторного преобразователя надета на разделительную трубку *5*, изготовленную из немагнитной стали. Принцип действия и устройство дифференциально-трансформаторных преобразователей, а также схемы дистанционной передачи с использованием их рассмотрены в гл. 8.

Ротаметр, показанный на рис. 16-3-2, *б*, отличается по своему устройству от рассмотренного только тем, что у него применен грибообразный поплавок *1*, перемещающийся под действием потока внутри вертикально расположенной конической вставки (трубки) *2*.

Ротаметры, выполняемые по рассмотренным схемам (рис. 16-3-2) в комплекте с вторичным прибором, имеют класс точности 2,5. Они выпускаются для измерения расхода среды, находящейся под рабочим избыточным давлением до 16 и 64 кгс/см^2 (1,6 и 6,4 МПа). Ротаметры могут быть изготовлены и на большее рабочее избыточное давление (ГОСТ 13045-67). Кроме того, предусматривается выполнение ротаметров с выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА (ГОСТ 13045-67).

Ротаметры с пневматическим выходным сигналом 0,2—1 кгс/см^2 (0,02—0,1 МПа) отличаются от рассмотренных приборов (рис. 16-3-2) наличием пневмообразователей. Для преобразования перемещения поплавка ротаметра в пневматический выходной сигнал применяют передающие пневматические преобразователи компенсационного типа, принцип действия которых рассмотрен в гл. 8.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ И СЧЕТЧИКИ КОЛИЧЕСТВА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

17-1. Тахометрические счетчики количества жидкостей

Общие сведения. Тахометрический счетчик количества жидкости состоит из тахометрического преобразователя расхода и счетного суммирующего механизма. Под тахометрическим преобразова-

телем расхода понимается первичный преобразователь, в котором скорость движения рабочего (чувствительного) элемента, взаимодействующего с потоком жидкости, пропорциональна объемному расходу.

Счетчики количества жидкостей применяют для измерения суммарного количества различных жидкостей (воды, нефти, мазута, бензина и т. д.), находящихся под давлением до 10—16 кгс/см^2 (1—1,6 МПа). По принципу действия выпускаемые тахометрические счетчики количества жидкостей разделяются на скоростные и объемные. Эти технические средства в зависимости от того, для измерения какой жидкости они предназначены, принято называть водосчетчиками, нефтесчетчиками, бензосчетчиками и т. д.

Для измерения суммарного количества холодной (до 30°С) и горячей (до 90°С) воды применяют главным образом скоростные счетчики. В скоростных счетчиках в качестве рабочего элемента применяют вертикальные и горизонтальные вертушки (турбинки). У счетчиков с вертикальной вертушкой поток жидкости, вращающий вертушку, направлен по касательной к окружности, описываемой средним радиусом вертушки. Такие крыльчатые вертушки (турбинки) обычно называют тангенциальными. У счетчиков с горизонтальной вертушкой поток жидкости направлен параллельно оси вертушки. Эти вертушки (турбинки) называют аксиальными.

Угловая скорость вертушки (турбинки) пропорциональна средней скорости потока жидкости, а следовательно, и объемному расходу. Число оборотов вертушки прибора суммируется счетным механизмом, а количество жидкости в единицах объема указывается счетным указателем.

Объемные тахометрические счетчики, обладающие более высокой точностью по сравнению со скоростными, применяют для измерения суммарного количества мазута, нефти, бензина и других жидкостей. В объемных счетчиках протекающая через него жидкость измеряется отдельными, равными по объему дозами, отсекаемыми одним или несколькими рабочими элементами. Число пропущенных доз жидкости суммируется счетным механизмом, а суммарное количество жидкости, прошедшее через прибор за определенный промежуток времени, показывается счетным указателем.

Кроме указанных применяются объемные счетчики жидкостей со свободным сливом. Они выполняются, например, в виде стационарных мерных баков или счетчиков с опрокидывающимися (или вращающимися) мерными камерами.

Счетчики количества жидкостей обычно характеризуются следующими техническими данными: калибром — размером диаметра условного прохода входного патрубка в миллиметрах; пределами допускаемой основной погрешности показаний, выраженной в процентах от действительного количества жидкости, протекшей через прибор; потерей давления, вызываемой прибором; начальным, номинальным и верхним пределами измерений; порогом чувствитель-

ности; емкостью счетчика — наибольшим значением количества жидкости, показываемым счетным механизмом; предельным допускаемым избыточным давлением и предельной температурой измеряемой жидкости.

Погрешность показаний рассматриваемых счетчиков зависит от вязкости и расхода жидкости и определяется обычно экспериментальным путем при различных расходах. Следует также иметь в виду, что потеря статического давления, вызываемая счетчиком, с увеличением расхода и вязкости жидкости возрастает. Поэтому потеря давления обычно служит критерием пропускной способности счетчика.

Под нижним пределом измерений счетчика понимают наименьший расход, при котором погрешность показаний прибора не превышает допускаемую. Номинальным расходом счетчика называют наибольший длительный расход, при котором погрешность показаний прибора не выходит за пределы допускаемой, а потеря статического давления не приводит к быстрому износу деталей прибора. Например, для счетчиков холодной воды с вертикальной крыльчатой вертушкой установлены номинальные расходы при потере давления не более 0,1 кгс/см^2 (0,01 МПа) ГОСТ 6019-66. Для объемных счетчиков жидкостей потеря давления обычно не превышает 0,3—0,5 кгс/см^2 (0,03—0,05 МПа). Под верхним пределом измерения счетчика понимают максимальный расход, допускаемый в течение одного часа в сутки.

При выборе счетчика необходимо иметь в виду, что калибр его может быть взят меньше диаметра трубопровода. В этом случае в трубопроводе до и после счетчика устанавливаются конические переходы.

Скоростные счетчики количества жидкостей. К скоростным счетчикам, как было сказано выше, относятся счетчики с вертикальной и горизонтальной вертушками. Счетчики с вертикальной крыльчатой вертушкой применяют главным образом для измерения суммарного количества воды в горизонтальных трубопроводах при небольших расходах (от 0,15 до 12,6 м^3/ч). Счетчики этого вида в зависимости от того, находится ли счетный механизм непосредственно в воде или отделен от нее соответствующим устройством, делятся на так называемые «мокроходы» и «сухоходы». Мокроходы имеют ряд преимуществ (меньше деталей, отсутствие сальника и т. д.) перед сухоходами, но их нормальная работа возможна только на воде с высокой степенью чистоты. Поэтому наибольшее распространение получили счетчики-сухоходы.

В зависимости от способа подведения воды к лопастям вертушки счетчика они разделяются на одноструйные и многоструйные. Как в одноструйных, так и в многоструйных счетчиках вода к лопастям вертушки подводится тангенциально. В одноструйных счетчиках жидкость подводится в камеру крыльчатой вертушки и отводится из нее на одном уровне, что обеспечивает ее протекание по кратчайшему пути без образования мертвых зон. Это умень-

шает потерю давления и одновременно уменьшает возможность оседания в счетчике взвешенных частиц песка и пр.

Корпус скоростного одноструйного водосчетчика выполняется с коническими патрубками для входа и выхода жидкости (рис. 17-1-1). В расширенной части входного патрубка установлена

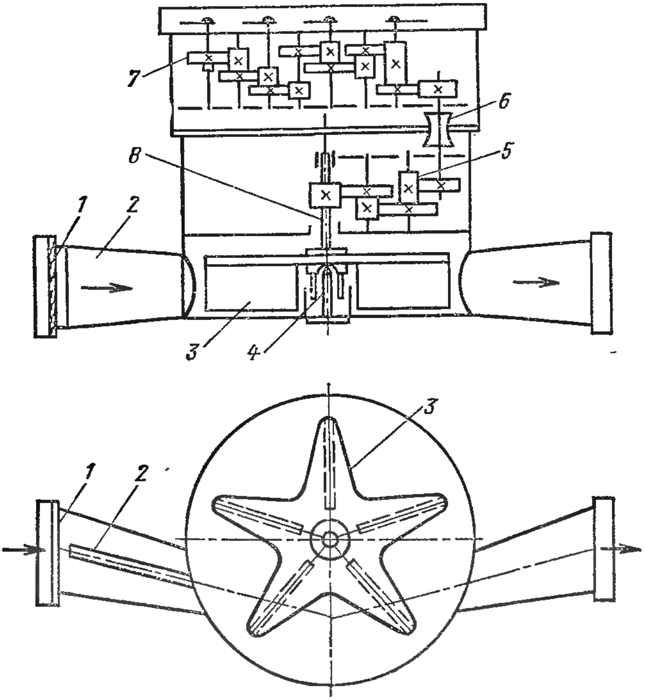


Рис. 17-1-1. Схема устройства скоростного одноструйного водосчетчика с вертикальной крыльчатой вертушкой («сухоход»).

1 — сетка; *2* — струевыпрямитель; *3* — крыльчатая вертушка; *4* — опорный шип; *5* — передаточный механизм (редуктор); *6* — сальник; *7* — счетный механизм; *8* — ось крыльчатой вертушки.

металлическая сетка, предохраняющая прибор от попадания посторонних тел. За сеткой во входном патрубке установлен струевыпрямитель. Крыльчатая вертушка прибора соединяется с помощью передаточного механизма (редуктора) со счетным механизмом; редуктор и счетный механизм соединены осью с сальниковым уплотнением. Счетный механизм отделен от проточной части прибора герметичной перегородкой, в которой установлен сальник передаточной оси.

В многоструйном счетчике вода через входной патрубок (на рис. 17-1-2 патрубок показан пунктиром) поступает в нижнюю полость корпуса, проходит через нижний ряд отверстий и несколь-

кими струями попадает на лопасти крыльчатки, приводя ее во вращение. Далее вода по спирали поднимается вверх вдоль оси вертушки и через верхний ряд отверстий поступает в верхнюю часть корпуса, а затем — в выходной патрубок. В многоструйных водосчетчиках вращение крыльчатки передается счетному механизму так же, как и у одноструйных (см. рис. 17-1-1).

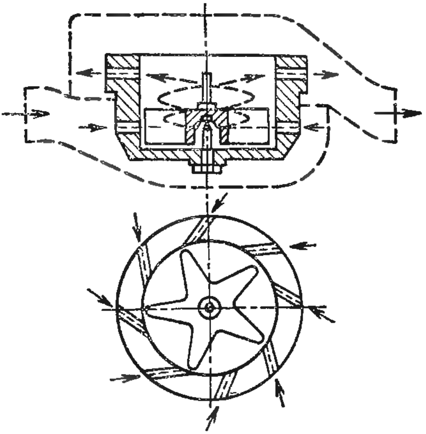


Рис. 17-1-2. Схема движения жидкости в многоструйном водосчетчике.

Счетчики с вертикальной крыльчатой вертушкой выпускаются калибром от 15 до 40 мм для измерения суммарного количества воды. Емкость счетного механизма (верхний предел показаний) этих приборов 10 000 $м^3$; наименьшая цена деления шкалы счетчика указателя 0,001 $м^3$. Наибольшее допускаемое избыточное давление воды 10 кгс/$см^2$ ($\sim$1 МПа). Пределы допускаемой основной погрешности показаний водосчетчиков при измерении в диапазоне от нижнего предела до номинального расхода не более $\pm$2%.

Скоростные счетчики с винтовой вертушкой применяют для измерения суммарного количества воды при расходах от 3 до 12 500 $м^3$/ч. Они могут быть установлены на горизонтальных участках, а также на наклонных и вертикальных участках с восходящим потоком жидкости. В водосчетчиках этого типа (рис. 17-1-3) жидкость, протекающая через прибор, вращает вертушку, представляющую собой многоходовой винт с большим шагом. Число оборотов винтовой вертушки пропорционально средней скорости потока жидкости и обратно пропорционально шагу лопасти

$$n = \kappa \frac{v_{ср}}{l}, \qquad (17\text{-}1\text{-}1)$$

где n — число оборотов вертушки в секунду; $v_{ср}$ — средняя скорость потока жидкости, м/с; κ — постоянный коэффициент для данного счетчика; l — шаг лопастей винтовой вертушки, м.

Преобразовав выражение (17-1-1) и подставив в него значение скорости

$$v_{ср} = \frac{Q_о}{F_о},$$

получим:

$$n = \frac{\kappa Q_о}{Fl}, \qquad (17\text{-}1\text{-}2)$$

где $Q_о$ — объемный расход жидкости, $м^3$/с; F — площадь живого сечения прибора, $м^2$.

Из уравнения (17-1-2) видно, что число оборотов вертушки пропорционально количеству протекающей жидкости. Для обеспечения постоянства метрологических характеристик прибора необходимо, чтобы направление потока жидкости было параллельно оси вертушки, так как незначительные отклонения в движении потока влияют на число оборотов. Для стабилизации направления потока перед вертушкой со стороны входа потока жидкости устанавливают струевыпрямитель (рис. 17-1-3). Необходимо, кроме того, чтобы перед прибором был прямой участок трубы длиной не менее (8—10)D, а после него — не менее 5 D, где D — диаметр трубы.

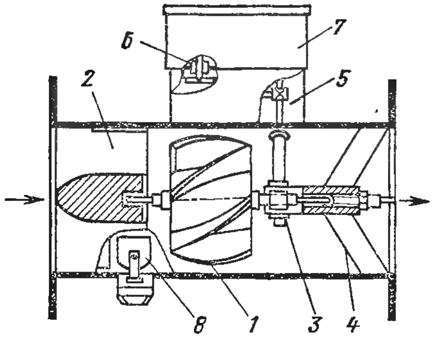


Рис. 17-1-3. Схема устройства скоростного водосчетчика с винтовой вертушкой.

1 — винтовая вертушка; *2* — струевыпрямитель; *3* — червячная пара; *4* — кронштейн; *5* — камера передаточного механизма (редуктора); *6* — передаточная ось с сальником; *7* — место расположения счетного механизма; *8* — регулятор.

Вертушка водосчетчика, как показано схематично на рис. 17-1-3, связана посредством червячной передачи и вала с передаточным механизмом (редуктором), а последний, в свою очередь, через передаточную ось с сальниковым уплотнением соединен со счетным механизмом. Для изменения угловой скорости вертушки счетчика при его градуировке служит пластина-регулятор. Пластина-регулятор, как видно из рис. 17-1-3, является продолжением укороченной радиальной перегородки струевыпрямителя.

Водосчетчики с винтовой вертушкой изготовляются калибром 50, 80, 100, 150, 200, 250 и 300 мм. Выпускаемые водосчетчики этого типа рассчитаны на предельное избыточное давление до 10 кгс/см^2 (1 МПа), хотя в отдельных случаях их выполняют и для давления до 15 кгс/см^2 (1,5 МПа). Пределы допускаемой основной погрешности показаний водосчетчиков при измерении в диапазоне от нижнего предела до номинального расхода — не более $\pm 2\%$. Технические характеристики водосчетчиков с винтовой вертушкой приведены в [75].

Скоростные счетчики широко применяются в системах водоснабжения и тепловых сетях. На современных ТЭС скоростные счетчики не применяют.

Объемные счетчики количества жидкостей. К числу этих средств измерений относятся счетчики количества жидкостей — поршневые, дисковые, с овальными шестернями, ротационные и др. [59, 75]. Объемные счетчики широко применяют в химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности. На современных ТЭС объемные счетчики не применяются, так как технические характеристики их не соответствуют нужным требованиям эксплуатации.

Ниже в качестве примера рассмотрим устройство объемных счетчиков поршневого типа. Существует несколько различных вариантов конструкций поршневых счетчиков. Наиболее распространенными являются приборы с одним и четырьмя поршнями. Для ознакомления с принципом работы поршневого счетчика рассмотрим упрощенную схему устройства однопоршневого прибора, показанную на рис. 17-1-4. Жидкость из трубы *1* через распределительный четырехходовой кран *2* поступает под поршень *3* и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, вытесняет жидкость, находящуюся в верхней полости цилиндра, через распределительный кран в трубу *4*. Когда поршень достигнет верхнего крайнего положения, четырехходовой кран, связанный специальным механизмом *5* со штоком поршня, перемещается в положение, показанное на рис. 17-1-4 пунктиром. Благодаря этому жидкость из трубы *1* будет поступать в верхнюю полость цилиндра, поршень начинает перемещаться вниз и из нижней полости жидкость вытесняется через четырехходовой кран и трубу *4*. С момента достижения поршнем крайнего положения цикл повторяется.

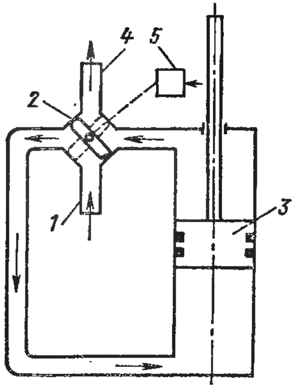


Рис. 17-1-4. Схема устройства однопоршневого счетчика.

Количество жидкости, прошедшее через счетчик за определенный промежуток времени, определяется по счетному механизму, связанному с помощью передаточного механизма со штоком поршня (на рис. 17-1-4 счетный механизм не показан).

Для поршневых счетчиков по сравнению с другими типами объемных счетчиков характерна большая потеря давления. Поршневые счетчики используются для измерения суммарного количества мазута, нефти, бензина и других жидкостей.

В промышленности широко применяют четырехпоршневой мазутомер типа МП [17]. Этот прибор изготовляют в качестве счетчика количества мазута, а также в качестве показывающего измерителя расхода мазута со счетным механизмом. Показывающий мазутомер МП может быть снабжен двумя передающими ферродинамическими преобразователями ПФ или частотными передающими преобразователями со струйным вибратором типа ПС (гл. 8).

Мазутомеры МП выпускаются с верхними пределами измерения от 50 до 4000 л/ч. Рабочее давление измеряемого мазута должно быть не более 10 кгс/см^2 (1 МПа); температура от 10 до 100° С. Наибольшая потеря давления в мазутомере не превышает 0,35 кгс/см^2 (0,035 МПа).

Пределы допускаемой основной погрешности суммирования $\pm 1\%$. Пределы допускаемой основной погрешности по шкале расхода $\pm 1{,}5\%$ для мазутомера и $\pm 2{,}5\%$ для вторичного прибора.

Из числа рассмотренных тахометрических счетчиков количества жидкостей мазутомеры типа МП при наличии указанных выше дополнительных устройств могут быть использованы одновременно и как расходомеры при автоматизации технологических процессов.

17-2. Тахометрические расходомеры жидкостей

Созданию технических средств для измерения расхода различных жидкостей и, в частности, мазута уделяется большое внимание. Из числа созданных за последние годы тахометрических расходомеров наибольшее внимание заслуживают скоростные турбинные и шариковые расходомеры. Преобразователи и вторичные приборы этих расходомеров имеют унифицированные выходные и входные сигналы постоянного тока. Унификация выходных и входных сигналов преобразователей и вторичных приборов тахометрических расходомеров и их элементов, узлов и блоков существенно повышает надежность действия дистанционной передачи и позволяет применять эти средства измерений для автоматизации технологических процессов и в системах с информационно-вычислительными и управляющими машинами.

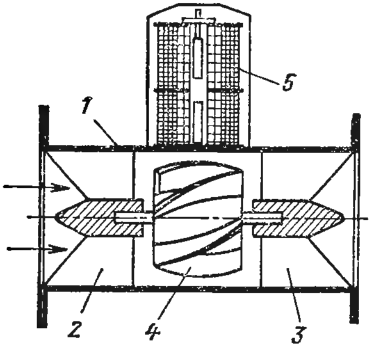


Рис. 17-2-1. Устройство первичного турбинного преобразователя расхода жидкости.

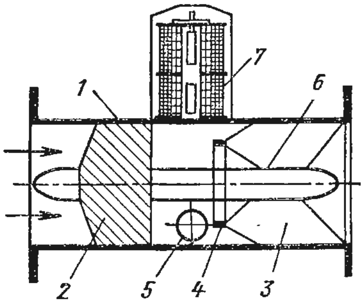


Рис. 17-2-2. Устройство первичного шарикового преобразователя расхода жидкости.

На рис. 17-2-1 схематично показано устройство первичного турбинного преобразователя расхода жидкости. Корпус преобразователя *1* представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса преобразователя установлены струевыпрямители *2* и *3*, соединенные неподвижной осью, на которой расположена турбинка (вертушка с винтовыми лопастями) *4*, вращающаяся на подшипниках (на рис. 17-2-1 подшипники не показаны). Лопасти турбинки преобразователя выполнены из ферромагнитного материала. На внешней стороне корпуса *1* установлен передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь *5*.

Устройство первичного шарикового преобразователя расхода жидкости схематично показано на рис. 17-2-2. Корпус шарикового преобразователя расхода выполнен аналогично с корпусом турбинного преобразователя. Внутри корпуса шарикового преобразователя *1* расположен неподвижный сборный узел, состоящий из струенаправляющего устройства *2*, выполненного в виде многозаходного винта, и струевыпрямителя *3*. На крестовине струевыпрямителя находится ограничивающее кольцо *4*. В пространстве между этим кольцом и струенаправляющим устройством находится шарик *5* из ферромагнитного материала, который может свободно вращаться вокруг ступицы *6*. На корпусе шарикового преобразователя установлен передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь *7*.

Наряду с показанным на рис. 17-2-2 преобразователем расхода НИИТеплоприбором разработан первичный шариковый преобразователь расхода с тангенциальным подводом измеряемой жидкости.

В рассмотренных первичных скоростных тахометрических преобразователях расхода жидкость, протекающая через преобразователь, приводит во вращение турбинку или шарик. Частота вращения турбинки или шарика пропорциональна средней скорости потока измеряемой жидкости в данном сечении преобразователя, а, следовательно, и объемному расходу. Установленный с наружной стороны корпуса первичного тахометрического преобразователя расхода бесконтактный передающий преобразователь формирует электрические импульсы, частота следования которых зависит от частоты вращения турбинки или шарика.

Наиболее широкое распространение получили два типа бесконтактных передающих преобразователей — магнитоэлектрический и дифференциально-трансформаторный. Магнитоэлектрический передающий преобразователь используется в первичных тахометрических преобразователях, имеющих большие диаметры условного прохода, а следовательно, и значительный крутящий момент на турбинке или шарике. Тормозной момент, создаваемый на турбинке или шарике преобразователя расхода передающим магнитоэлектрическим преобразователем, примерно на два порядка больше, чем у дифференциально-трансформаторного. Поэтому первичные тахометрические преобразователи расхода, имеющие малые диаметры условного прохода, передающими магнитоэлектрическими преобразователями не снабжаются.

Передающий магнитоэлектрический преобразователь состоит из постоянного магнита, на котором намотана катушка. Прохождение мимо торца магнита ферромагнитной лопасти турбинки или шарика приводит к появлению электрического импульса в цепи катушки.

Передающие дифференциально-трансформаторные преобразователи применяются в выпускаемых первичных турбинных и шариковых преобразователях расхода с диаметрами условного прохода

до 200 мм. Импульсный сигнал измерительной информации передающего преобразователя тахометрического расходомера обычно преобразовывается в унифицированный выходной сигнал постоянного тока с помощью дополнительного (приемного) электронного преобразователя.

На рис. 17-2-3 показана схема скоростного тахометрического расходомера жидкости. На этой схеме приняты следующие обозначения: *ППР* — первичный тахометрический преобразователь расхода (шариковый или турбинный); *ПДТП* — передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь; *ПЭП* — приемный электронный преобразователь, состоящий из генератора *Г*, уси-

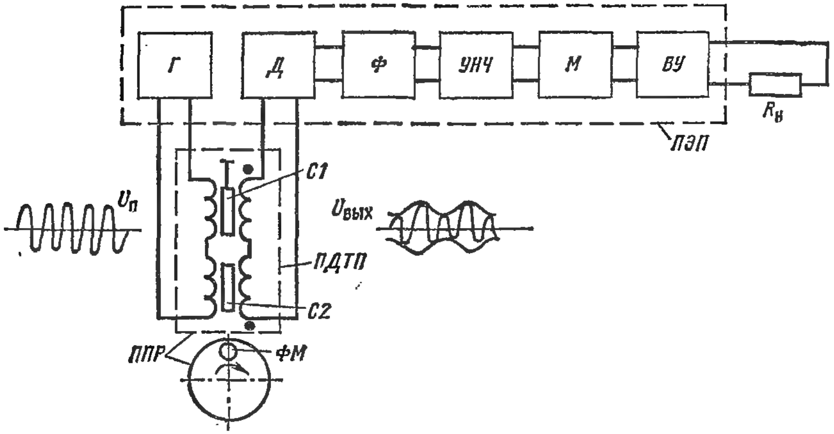


Рис. 17-2-3. Электрическая схема скоростного тахометрического расходомера жидкости.

лителя-демодулятора *Д*, фильтра *Ф*, усилителя низкой частоты *УНЧ*, мультивибратора *М* и выходного узла *ВУ*; $R_н$ — сопротивление внешней нагрузки (например, вторичного прибора, интегратора, регулирующего прибора и линии связи).

Преобразователь *ПДТП* состоит из первичной обмотки, питаемой от генератора *Г* переменным током частотой 3—6 кГц, двух секций вторичной (выходной) обмотки, включенных встречно, и двух сердечников *С1* и *С2*. С помощью подвижного сердечника *С1* производится регулировка взаимных индуктивностей между секциями вторичной и первичной обмоток таким образом, чтобы в выходной цепи преобразователя при отсутствии ферромагнитной массы *ФМ* у нижнего торца преобразователя *ПДТП* остаточная э. д. с. имела как можно меньшее значение.

При проходе ферромагнитной массы (шара или лопасти турбинки) у нижнего торца преобразователя *ПДТП* изменяется взаимная индуктивность между секциями вторичной и первичной обмоток, что приводит к возникновению на выходе преобразователя сиг-

нала переменного тока $U_{вых}$ с частотой 3—6 кГц, амплитуда которого в несколько раз больше значения остаточного (нулевого) сигнала. С выхода преобразователя сигнал $U_{вых}$, модулированный по амплитуде, подается на вход усилителя демодулятора *Д* и далее — на фильтр нижних частот *Ф*, который выделяет несущую частоту 3—6 кГц и пропускает напряжение с частотой модуляции на вход усилителя низкой частоты *УНЧ*. Усиленное напряжение поступает на ждущий мультивибратор *М* для формирования импульсов. Выходная часть *ВУ* приемного преобразователя *ПЭП* преобразовывает импульсные сигналы в выходной унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 мА.

Питание приемного электронного преобразователя *ПЭП* осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

В качестве вторичных показывающих или самопишущих приборов могут быть использованы миллиамперметры типа КПУ, КСУ и другие приборы ГСП.

Рассмотренная выше схема устройства тахометрического расходомера реализована в турбинном расходомере мазута типа ТМ1, разработанном СКБ «Нефтехимприбор» [76]. Расходомер ТМ1 состоит из первичного турбинного преобразователя расхода Пр5, снабженного передающим дифференциально-трансформаторным преобразователем ДТП-1, и приемным нормирующим преобразователем типа ПН5 с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА. В качестве вторичных приборов могут быть использованы указанные выше миллиамперметры и интегратор типа С-1.

Преобразователи расхода Пр5 изготовляют с диаметрами условного прохода 32, 50, 80, 125 и 200 мм для измерения наибольшего расхода мазута 6,3 (1,25); 16 (3,2); 40 (8); 100 (20); 240 (48) $м^3/ч$ соответственно (в скобках указан наименьший расход мазута). Турбинные преобразователи Пр5 предназначены для измерения расхода топочного мазута (марок Ф-5, Ф-12, М-40, М-100, ГОСТ 10585-83), находящегося под избыточным давлением до 64 $кгс/см^2$ (6,4 МПа) при температуре от 50 до 150°С. Кинематическая вязкость мазута при этих температурах лежит в пределах от 25 до 30 сст ($25 \cdot 10^{-6}$—$30 \cdot 10^{-6}$ $м^2/с$).

Пределы допускаемой основной погрешности в диапазоне от 30 до 100% не превышают ±2%, а в диапазоне от 20 до 30% — ±2,5%. Потеря давления при наибольшем расходе не более 0,5 $кгс/см^2$ (0,05 МПа).

Схемы устройства первичного шарикового преобразователя расхода (см. рис. 17-2-2), передающего и приемного преобразователя (см. рис. 17-2-3) реализованы в шариковых расходомерах типа «Сатурн», разработанных НИИтеплоприбором. Первичные преобразователи расходомеров типа «Сатурн» могут быть выполнены с диаметрами условного прохода от 32 до 150 мм для измерения наибольшего расхода воды и водных растворов от 4 до 160 $м^3/ч$ соответственно. Шариковые преобразователи расхода рассчитаны на предельно допускаемое рабочее давление до 64 $кгс/см^2$ (6,4 МПа) и температуру измеряемой жидкости от —30 до +90°С.

Приемный преобразователь расходомера «Сатурн» имеет унифицированный выходной сигнал 0—5 мА и, кроме того, выходной сигнал постоянного напряжения 0—100 мВ. В качестве вторичных приборов могут быть использованы миллиамперметры и другие приборы, рассмотренные выше.

Пределы допускаемой основной погрешности показаний в диапазоне от 30 до 100% — не более ±1,6%. Потеря давления при наибольшем расходе—не более 0,5 $кгс/см^2$ (0,05 МПа).

К достоинствам первичных шариковых преобразователей расхода следует отнести простоту устройства. Кроме того, шариковые преобразователи расхода (в отличие от турбинных) вследствие отсутствия подшипников могут быть использованы для измерения расхода жидких сред с абразивными частицами.

17-3. Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные (индукционные) расходомеры применяют для измерения в трубопроводах объемного расхода электропроводных жидкостей, растворов и пульп с мелкодисперсными неферромагнитными частицами. Удельная электрическая проводимость измеряемой среды должна находиться в пределах от 10^{-3} до 10 См/м (ГОСТ 11988-66). Следует отметить, что некоторые разновидности электромагнитных расходомеров находят применение для измерения расхода жидкого металлического теплоносителя, например натрия.

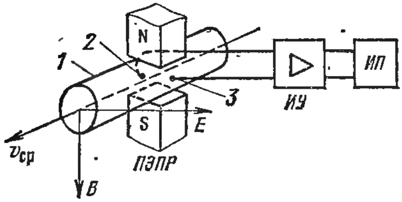


Рис. 17-3-1. Схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем.

Принцип действия рассматриваемых расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому наведенная в проводнике э. д. с. пропорциональна скорости его движения в магнитном поле. Роль движущегося в магнитном поле проводника играет электропроводная жидкость, протекающая через первичный электромагнитный преобразователь расхода, установленный в трубопроводе. Измеряя э. д. с., наведенную в электропроводной жидкости, которая при своем движении пересекает магнитное поле первичного преобразователя, можно определить среднюю скорость текущей жидкости, а вместе с тем и объемный расход.

Измерение расхода жидкости электромагнитным методом может быть осуществлено как при постоянном возбуждающем магнитном поле, так и при переменном поле первичного преобразователя расхода. Указанные способы создания магнитного поля имеют свои положительные и отрицательные стороны, рассматриваемые ниже.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем изображена на рис. 17-3-1. Прибор состоит из первичного электромагнитного преобразователя расхода *ПЭПР*, электронного измерительного усилителя *ИУ* и вторичного измерительного прибора *ИП*. Корпус преобразователя расхода представляет собой отрезок трубы *1* из немагнитного материала с двумя фланцами (на рис. 17-3-1 фланцы не показаны) для присоединения его к фланцам трубопровода. На внешней стороне корпуса преобразователя установлен постоянный магнит *NS*, магнитные силовые линии которого перпендикулярны вектору скорости движения жидкости. Для съема выходной э. д. с. преобра-

зователя расхода служат электроды *2* и *3*, проходящие через стенку трубы *1*.

Электрическая проводимость материала трубы должна быть значительно меньше проводимости жидкости, так как в противном случае возможно шунтирование стенкой трубы выходной э. д. с. Если позволяют условия применения преобразователя расхода, то трубу целесообразно изготовлять из изоляционного материала. При необходимости труба может быть изготовлена из немагнитного металла, например из немагнитной нержавеющей стали с большим удельным сопротивлением. В этом случае внутренняя поверхность металлической трубы изолируется от жидкости специальным изоляционным материалом. Электроды для съема выходной э. д. с. также должны быть электрически изолированы от металлической трубы.

При протекании электропроводной жидкости через преобразователь расхода направление наводимой э. д. с. E можно определить по правилу правой руки.

Если вектор скорости движения жидкости $v_{ср}$ перпендикулярен к направлению магнитного поля, то выходная э. д. с. преобразователя расхода с электродами *2* и *3* (рис. 17-3-1), диаметрально расположенными на контуре поперечного сечения потока в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля, определяется выражением, аналогичным уравнению для прямолинейного проводника:

$$E = v_{ср} DB, \tag{17-3-1}$$

где E — выходная э. д. с., В; $v_{ср}$ — средняя скорость движения жидкости, м/с; D — внутренний диаметр трубы (расстояние между электродами), м; B — магнитная индукция, Т.

Выражая в уравнении (17-3-1) скорость v через объемный расход $Q_о = \frac{\pi D^2 v_{ср}}{4}$, получаем:

$$E = \frac{4BQ_о}{\pi D}. \tag{17-3-2}$$

Это выражение показывает, что значение выходной э. д. с. прямо пропорционально значению объемного расхода.

Преимуществом преобразователей расхода с постоянным магнитным полем является то, что значительно облегчается борьба с помехами от внешних переменных электромагнитных полей. К числу достоинств следует также отнести отсутствие необходимости в источнике питания преобразователя расхода, безопасность работы его и ряд других факторов. Следует также иметь в виду, что преобразователи расхода с постоянным магнитным полем обладают значительно большим быстродействием, чем преобразователи расхода с переменным магнитным полем. У преобразователей последнего типа быстродействие ограничивается частотой поля.

Основным недостатком первичных преобразователей расхода с постоянным магнитным полем является поляризация электродов.

Явление поляризации характеризуется возникновением двойного слоя зарядов на границе электрод — жидкость. По мере накопления этих зарядов возникает э. д. с., направленная против основной измеряемой выходной э. д. с. E.

Возникновение двойного электрического слоя, а следовательно, и противоэлектродвижущих сил приводит к нарушению градуировки прибора и делает невозможным его стабильную работу в течение даже короткого времени. Применение в преобразователях расхода неполяризующих электродов (платиновых, графитовых, каломельных и др.) уменьшает эффект поляризации, но не устраняет его полностью.

Другим недостатком преобразователя расхода с постоянным магнитным полем является трудность усиления напряжения постоянного тока, особенно при большом внутреннем сопротивлении преобразователя.

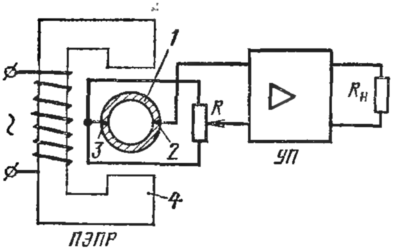


Рис. 17-3-2. Схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем.

Расходомеры с постоянным магнитным полем, как показала практика, являются больше объектами опытно-исследовательской работы, чем средствами измерений промышленного типа. Основным препятствием для внедрения этих расходомеров в широкую практику является трудность борьбы с влиянием электрохимических процессов. Первичные преобразователи расхода с постоянным магнитным полем, разработанные для измерения расхода расплавленного натрия и переменного во времени расхода жидкости, не получили широкого промышленного применения.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем показана на рис. 17-3-2. На схеме приняты следующие обозначения: *ПЭПР* — первичный электромагнитный преобразователь расхода с переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом *4*; *УП* — промежуточный измерительный усилитель-преобразователь с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА; $R_н$ — сопротивление внешней нагрузки (например, вторичный прибор, интегратор, входное устройство информационно-вычислительной машины и линия связи). Требования, предъявляемые к материалам для изготовления трубы *1* и электродов *2* и *3* преобразователя расхода с переменным магнитным полем, аналогичны перечисленным при рассмотрении прибора, показанного на рис. 17-3-1. Длину трубы *1* выбирают в зависимости от ее диаметра с таким расчетом, чтобы обеспечить симметричность профиля скоростей потока относительно оси трубы преобразователя расхода. Трубу пребразователей расхода, выпускаемых серийно, изготовляют из нержавеющей стали Х18Н10Т или Х18Н9Т, а электроды — из нержавеющей стали Х18Н9Т. Для изоляции

внутренней поверхности трубы применяют полиуретановый каучук (до 40°С), резину (до 70°С), фторопласт и кислостойкую эмаль ЛК-1 (до 150°С) и другие изоляционные материалы.

При выполнении электромагнита преобразователя расхода важно обеспечить однородность магнитного поля в осевом и поперечном направлениях. Неоднородность поля приводит к тому, что в жидкости (неподвижной и движущейся) возникают местные циркуляционные токи, размер которых определяется напряженностью поля в данной точке и в жидкости появляются разностные напряжения, искажающие измерения. Кроме того, при переходе от ламинарного потока течения жидкости к турбулентному появляется некоторая разность напряжений, приводящая к нелинейной зависимости между выходным сигналом и измеряемым расходом. Для

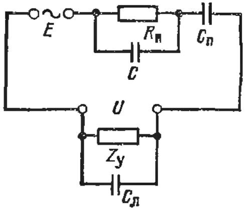


Рис. 17-3-3. Эквивалентная схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем.

E — э. д. с. преобразователя расхода; $R_п$ и C — соответственно внутренние активное сопротивление и емкость преобразователя расхода; $C_п$ — емкость поляризации; $Z_у$ — входное сопротивление усилителя-преобразователя; $C_л$ — емкость линии связи; U — напряжение на входе усилителя-преобразователя.

промышленных электромагнитных расходомеров допускается неоднородность поля 1—5% в зависимости от класса точности прибора.

Магнитная индукция для преобразователя расхода с переменным магнитным полем имеет значение

$$B = B_{макс} \sin \omega t. \tag{17-3-3}$$

В этом случае выражение (17-3-1) принимает вид:

$$E = v_{ср} D B_{макс} \sin \omega t \tag{17-3-4}$$

или с учетом уравнения (17-3-2)

$$E = \frac{4Q_о}{\pi D} B_{макс} \sin \omega t. \tag{17-3-5}$$

Следует отметить, что эффект поляризации электродов оказывает вредное воздействие на полезный сигнал преобразователя расхода и при переменном магнитном поле, но в значительно меньшей степени, чем при постоянном. Поляризация приводит к образованию на поверхности электродов двойного слоя зарядов и нарастанию э. д. с. поляризации, что проявляется как некоторая емкость $C_п$ со значением в несколько десятков микрофарад, включенная последовательно в цепь преобразователя расхода (рис. 17-3-3). Влияние поляризации электродов на точность измерения с возрастанием частоты поля уменьшается. Вредное влияние поляризации электродов на полезный сигнал уменьшается также с ростом значения входного сопротивления усилителя-преобразователя [59].

Зависимость между напряжением на входе усилителя-преобразователя U и э. д. с. E, снимаемой с электродов преобразователя расхода, имеет вид:

$$U = \frac{E}{1 + \frac{Z_п}{Z_у}}, \tag{17-3-6}$$

где $Z_у$ — входное сопротивление усилителя-преобразователя; $Z_п$ — внутреннее сопротивление преобразователя расхода согласно формуле (обозначения соответствуют принятым на рис. 17-3-3)

$$Z_п = \frac{1}{\frac{1}{R_п} + j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_п}.$$

Для обеспечения надлежащей точности измерения, а вместе с тем сведения к минимуму влияния поляризации электродов увеличивают частоту поля и повышают входное сопротивление усилителя-преобразователя $Z_у$ по сравнению со значением $Z_п$. Для достижения независимости показаний прибора от свойств и параметров измеряемой жидкости (ее химического свойства, вязкости, температуры, плотности и т. д.) необходимо, чтобы отношение $Z_п/Z_у$ было минимальным. Если $Z_у \gg Z_п$, влияние изменения внутреннего сопротивления преобразователя расхода $Z_п$ минимально.

Основным недостатком расходомеров с переменным магнитным полем является высокая чувствительность к помехам от переменных электромагнитных полей. Эти помехи можно разделить на следующие три группы: помехи от внешних электромагнитных полей; емкостные помехи от сети переменного тока, питающего электромагнит преобразователя расхода; индукционные помехи от электромагнита преобразователя расхода.

Для защиты от внешних электромагнитных полей применяют экранирование основных элементов преобразователя расхода и некоторых узлов измерительного блока.

Для борьбы с емкостными помехами уменьшают индуктивность катушки электромагнита преобразователя расхода. Кроме того, применяют разделительный трансформатор для питания электромагнита преобразователей расхода.

Рассмотрим причины образования помехи от электромагнита преобразователя расхода, а также способы, применяемые для компенсации ее. В замкнутом контуре «электрод — жидкость — электрод — вход измерительного усилителя — электрод», как в витке трансформатора, наводится переменным магнитным полем преобразователя расхода помеха, называемая трансформаторной э.д.с., независимо от того, движется жидкость в трубе преобразователя расхода или находится в покое. Значение трансформаторной э. д. с. равно:

$$E_{тр} = -\kappa \frac{dB}{dt} = -\kappa\omega B_{макс} \cos \omega t, \tag{17-3-7}$$

где κ — коэффициент, имеющий постоянное значение.

Таким образом, на входе усилителя-преобразователя будут действовать напряжение полезного сигнала U (17-3-6) и напряжение помехи

$$U_{\text{тр}} = \frac{E_{\text{тр}}}{1 + \frac{Z_{\text{п}}}{Z_{\text{у}}}}. \tag{17-3-8}$$

Из приведенных выражений видно, что напряжение помехи $U_{\text{тр}}$ сдвинуто на 90° относительно фазы сигнала U. Кроме того, напряжение помехи пропорционально частоте магнитного поля $f = \omega/2\pi$, в то время как полезный сигнал от частоты не зависит. Значение $U_{\text{тр}}$ можно уменьшить за счет уменьшения частоты для определенного предела и площади контура, образованного проводниками, соединяющими электроды с усилителем-преобразователем и находящимися в магнитном поле преобразователя расхода. Питание электромагнитных расходомеров, выпускаемых серийно, осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В.

Для компенсации трансформаторной э. д. с. выводы от одного из электродов монтируются симметрично расположенными проводами, замкнутыми на низкоомный регулирующий резистор R (рис. 17-3-2). Сигнал, получаемый от преобразователя расхода, снимается с движка резистора R и другого электрода. При настройке расходомера (когда преобразователь расхода заполнен жидкостью и она неподвижна) изменением положения движка резистора R выбирается точка, потенциал которой равен потенциалу второго электрода. Выходной сигнал преобразователя расхода подается на вход измерительного усилителя-преобразователя по экранированному кабелю.

Таллинский приборостроительный завод серийно выпускает электромагнитные (индукционные) расходомеры типа ИР, выполняемые по схеме рис. 17-3-2, с диаметрами условных проходов от 10 до 300 мм. Эти приборы в зависимости от типа покрытия внутренней поверхности трубы преобразователя расхода могут быть использованы для измерения различных электропроводных жидкостей (абразивных, пульп, кислот и т. д.), имеющих температуру от —40 до +150°С. Выпускаемые расходомеры типа ИР рассчитаны на максимальное рабочее избыточное давление до 10 и 25 кгс/см² (1 и 2,5 МПа).

Пределы допускаемой основной погрешности расходомеров типа ИР при измерении по выходному току не превышают ±1,5% верхнего предела измерений.

Питание комплекта расходомера типа ИР осуществляется от сети переменного тока частотой 50 Гц при напряжении 220 В.

Необходимые сведения об установке первичного преобразователя расхода и усилителя-преобразователя (измерительного блока) приводятся в инструкции завода-изготовителя. В качестве вторичных приборов могут быть использованы рассмотренные выше автоматические миллиамперметры КСУ, КПУ и другие приборы. Для суммирования объемного расхода жидкости может быть использован интегратор типа С-1.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ТЕПЛА В ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

18-1. Общие сведения

Измерение расхода и количества тепла, отдаваемого потребителю нагретой в теплообменниках ТЭЦ сетевой водой, играет весьма важную роль для объективного контроля и автоматизации тепловых сетей. В настоящее время в ряде случаев измерение расхода и количества отпускаемого или потребляемого тепла осуществляется расчетным путем по данным раздельного измерения температуры подающей (прямой) и обратной сетевой воды и ее расхода с помощью самопишущих приборов. Такой метод измерения расхода и количества тепла требует значительных затрат труда на вычислительные работы и при этом не обеспечивает необходимой точности измерения, а вместе с тем и не позволяет осуществить объективный контроль и автоматизацию тепловых сетей.

Расход тепла q, отпускаемый потребителю в единицу времени Дж/ч, выражается уравнением

$$q = Q_м (i_1 - i_2) = Q_о \rho (i_1 - i_2), \qquad (18\text{-}1\text{-}1)$$

или

$$q = Q_м c_в (t_1 - t_2) = c_в \rho Q_о (t_1 - t_2), \qquad (18\text{-}1\text{-}2)$$

где $Q_м$ и $Q_о$ — расход воды в подающей линии соответственно массовый (кг/ч) и объемный (м^3/ч); i_1 и i_2 — удельная энтальпия соответственно прямой и обратной воды, Дж/кг; $c_в$ — удельная теплоемкость воды, Дж/ (кг·°С); ρ — плотность прямой воды, кг/м^3; t_1 и t_2 — температура прямой и обратной воды, °С.

Прибор, измеряющий расход тепла в единицу времени, называется тепломером. Прибор, измеряющий расход и количество теплоты за некоторый промежуток времени $\tau = \tau_1 - \tau_2$, называется тепломером со счетчиком количества тепла или просто теплосчетчиком. С помощью счетчика тепломера определяют количество тепла $q_{к.т}$ в джоулях, полученное потребителем за отчетное время:

$$q_{к.т} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} q \, d\tau. \qquad (18\text{-}1\text{-}3)$$

Для реализации алгоритма (18-1-2) тепломер должен состоять из приборов, измеряющих расход прямой сетевой воды и разность температур прямой и обратной воды, корректирующего и множительного устройств и интегратора. В качестве прибора для измерения расхода воды могут быть использованы тахометрический и электромагнитный индукционный расходомер или дифманометр — расходомер с сужающим устройством. Для измерения разности температур прямой и обратной воды могут быть использованы термометры сопротивления или термоэлектрические термометры.

В тепловых сетях температура прямой воды, находящейся под давлением до 10 кгс/см² (1 МПа), в зависимости от температуры наружного воздуха поддерживается в пределах 70—150°C, а обратной воды, находящейся под давлением до 3—4 кгс/см² (0,3—0,4 МПа), лежит в интервале 30—70°C.

Пределы допускаемой основной погрешности существующих тепломеров не превышают ±2,5% нормирующего значения измеряемой величины. При оценке погрешностей результата измерения количества или расхода тепла, отпускаемого потребителю, необходимо учитывать возможные методические погрешности, а также изменение показаний тепломера, обусловленное влиянием температуры окружающего воздуха и других влияющих величин.

18-2. Основные сведения об устройстве тепломеров

Следует отметить, что несмотря на очевидную целесообразность применения тепломеров они до настоящего времени широкого распространения не получили. На рис. 18-2-1 показана упрощенная схема тепломера. В этой схеме используются средства измерений с унифицированным входным и выходным сигналами. Разность температур прямой и обратной воды измеряется с помощью

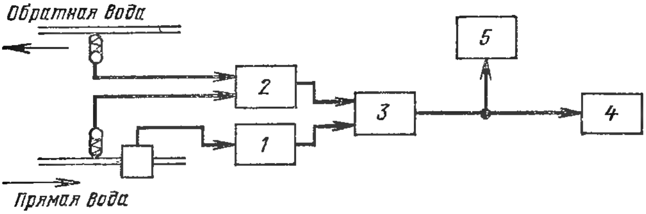


Рис. 18-2-1. Схема тепломера.

термометров сопротивления и измерительного преобразователя *2* с выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА. Для измерения расхода прямой воды используется тахометрический или индукционный преобразователь расхода и измерительный блок *1* с выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА.

Выходные сигналы преобразователя *2* и измерительного блока *1* поступают на вход множительного преобразовательного устройства *3*, выходной сигнал постоянного тока (0—5 мА) которого пропорционален расходу тепла. В качестве вторичного прибора, показывающего расход тепла (Дж/ч), используется миллиамперметр *4*, например, типа КПУ1 или КСУ2. Для определения количества тепла в джоулях, отпущенного потребителю за некоторый промежуток времени, служит интегратор *5* со счетным механизмом.

В рассмотренной схеме тепломера не показаны устройства для коррекции нелинейности при измерении разности температур

и возможных отклонений от принятых расчетных значений удельной теплоемкости и плотности воды.

Таллинский завод измерительных приборов изготовляет тепломеры со счетчиками тепла или так называемые теплосчетчики типа ТС-20, предназначенные для измерения расхода и количества отпущенного или потребленного тепла в тепловых сетях при условии равенства расхода сетевой воды в подающей и обратной линиях. Следует отметить, что в реальных условиях достигнуть полного равенства расхода воды в подающей и обратной линиях вследствие утечек невозможно.

При разработке теплосчетчика ТС-2 использована зависимость расхода тепла в единицу времени, выраженная уравнением (18-1-1). Так как непосредственное измерение плотности и удельной энтальпии сетевой воды осуществить сложно, зависимость (18-1-1) заменена приближенной

$$q \approx Q_0 k \frac{t_1 - m(t_2 + a)}{t_1 + b}, \qquad (18\text{-}2\text{-}1)$$

где a, b, k и m — постоянные коэффициенты, а остальные обозначения соответствуют принятым выше.

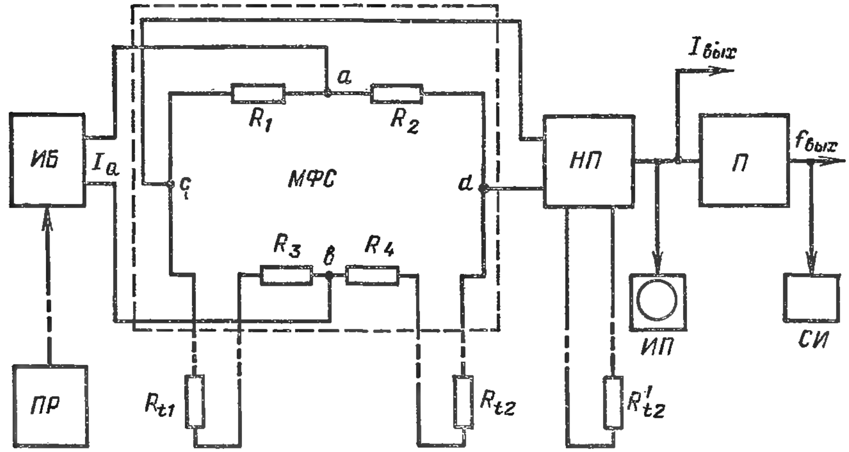


Рис. 18-2-2. Упрощенная принципиальная схема тепломера со счетчиком тепла.

Если давление сетевой воды в подающей и обратной линиях постоянно, а температура воды находится в указанных выше пределах, то погрешность указанной аппроксимации не превышает 0,2%. Алгоритм (18-2-1) реализуется с помощью автоматического измерительного прибора, упрощенная схема которого показана на рис. 18-2-2. Автоматический прибор содержит мостовую функциональную схему *МФС*, нормирующий преобразователь *НП*, преобразователь «ток—частота» *П*. В качестве вторичных измерительных приборов используются миллиамперметр *ИП*, показывающий расход тепла q, и электромеханический счетчик *СИ* для индикации отпущенного тепла в соответствии с выражением (18-1-3).

К диагонали питания моста *МФС* (зажимы a, b) подается сигнал постоянного тока I_Q (0—5 мА), пропорциональный объемному расходу прямой воды. Для измерения расхода воды используется индукционный расходомер ИР-51 (или ИР-11), состоящий из преобразователя расхода *ПР* и измерительного блока *ИБ*. В плечи нижней ветви моста *МФС* включены термометры сопротивления R_{t1} и R_{t2} для измерения температуры сетевой воды t_1 в подающей и t_2 обратной линиях. Выходной сигнал моста снимается с вершин c, d и преобразуется нормирующим преобразователем *НП* в сигнал постоянного тока $I_{вых}$. Для более точной реализа-

ции выражения (18-2-1) в цепь отрицательной обратной связи преобразователя *НП* включена схема коррекции, состоящая из дополнительного термометра сопротивления R'_{t2} для измерения температуры воды в обратной линии и трех постоянных резисторов, которые на схеме не показаны.

Преобразователь «ток—частота» *П* преобразует токовый сигнал $I_{вых}$ в последовательность импульсов, частота следования которых пропорциональна значению расхода тепла q. Суммирование счетных импульсов производится в выходном устройстве, содержащем шестиразрядный электромеханический счетчик *СИ*. Выходной частотный сигнал $f_{вых}$ может быть использован для дистанционной передачи.

Интегральное количество тепла в джоулях определяется по формуле

$$q_{к.\,т} = KN,$$

где K — цена импульса (указывается в паспорте); N — число единиц счетчика за определенное время.

Предел допускаемой основной погрешности теплосчетчика 2,5% нормирующего значения измеряемой величины.

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ И СЫПУЧИХ ТЕЛ

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

19-1. Общие сведения

Измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов во многих отраслях промышленности. Эти измерения особенно важны в тех случаях, когда поддержание некоторого постоянного уровня, например уровня воды в барабане парогенератора, уровня жидкости в резервуарах, аппаратах и других устройствах, связано с условиями безопасной работы оборудования. Технические средства, применяемые для измерения уровня жидкости, называются уровнемерами. Приборы, предназначенные для сигнализации предельных уровней жидкости, называются сигнализаторами уровня. Уровнемеры также имеют широкое применение в различных отраслях промышленности для измерения по уровню количества жидкости, находящейся в резервуарах, баках и других устройствах.

Уровнемеры, предназначенные для измерения уровня жидкости с целью поддержания его постоянным, имеют двустороннюю шкалу. Шкалы и диаграммная бумага этих уровнемеров градуируются в сантиметрах или метрах, а приборов, применяемых для измерения уровня воды в барабане парогенераторов, — в миллиметрах.

Уровнемеры, служащие для измерения по уровню количества жидкости в резервуарах, баках и других устройствах, имеют одностороннюю шкалу. Шкалы и диаграммная бумага этих уровнемеров градуируются в сантиметрах и метрах, а иногда в процентах.

Уровнемеры, применяемые для измерения уровня жидкости с целью поддержания его постоянным в определенных пределах, снабжают устройством для сигнализации предельных отклонений уровня от заданного значения.

У сигнализаторов уровня жидкости контактное устройство срабатывает при некотором заданном значении уровня для данного объекта.

В зависимости от требований, предъявляемых к автоматизации технологических процессов, применяют различные методы измерения уровня жидкости. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, уровень жидкости с достаточной точностью и надежностью можно измерять с помощью указательных стекол или показывающими дифманометрами-уровнемерами, описанными

в гл. 12. Измерение уровня жидкости указательными стеклами основано на принципе сообщающихся сосудов. Конструкция арматуры и материал указательных стекол зависят от давления и температуры жидкости, уровень которой необходимо контролировать.

Для дистанционного измерения уровня жидкостей, находящихся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, применяют метод измерения по разности давлений с помощью дифманометров. Во многих отраслях промышленности используют также метод контроля уровня жидкостей с помощью поплавка (или буйка).

В химической, нефтехимической и в ряде других отраслей промышленности кроме указанных выше методов измерения уровня жидкостей находят применение емкостные, ультразвуковые, акустические и радиоизотопные уровнемеры. Для измерения уровня агрессивных кристаллизирующихся жидкостей и пульп в открытых емкостях применяют пьезометрические уровнемеры [75, 77].

19-2. Измерение уровня воды в барабане парогенераторов

Нормальная эксплуатация барабанных парогенераторов может осуществляться только при условии строгого поддержания уровня воды в барабане в некоторых допускаемых пределах. Поэтому измерение уровня воды в барабане, особенно современных мощных парогенераторов, имеющих весьма ограниченный запас воды, является важной и ответственной задачей при их эксплуатации.

Контроль уровня воды в барабане парогенераторов с малой паропроизводительностью и низким давлением пара в барабане осуществляется путем непосредственного наблюдения за уровнем по водомерному устройству, поставляемому совместно с парогенератором. В ряде случаев для большей надежности дополнительно устанавливают непосредственно у парогенератора сниженный указатель уровня воды в барабане. В этом случае применяют показывающие дифманометры-уровнемеры или сниженный указатель уровня «Игема» [34].

Парогенераторы производительностью 35 т/ч и выше наряду с водоуказательными устройствами на барабане, поставляемыми совместно с ними, оснащаются дополнительно дифманометрами-уровнемерами. Вторичные показывающие и самопишущие приборы уровнемеров устанавливаются на щите управления парогенератора или блока. Эти приборы обычно снабжены контактным устройством для сигнализации недопускаемого изменения уровня воды в барабане парогенераторов.

На современных мощных парогенераторах ТЭС кроме уровнемеров для измерения уровня воды в барабане устанавливают дополнительно дифманометры-уровнемеры со вторичными показывающими приборами, снабженными контактным устройством. С помощью этих уровнемеров осуществляется технологическая защита при

перепитке парогенератора водой и при упуске уровня в его барабане. При этом контакты вторичных приборов уровнемеров включаются в устройство защиты по схеме «два из двух» или «два из трех» [78].

В качестве уровнемеров широко применяют дифманометры мембранные типа ДМ (гл. 12) в комплекте со вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы (гл. 8) или дифманометры-уровнемеры типа ДМЭ с выходным сигналом постоянного тока, работающие совместно со вторичными приборами типа КСУ, КПУ и др. (гл. 4), а также с автоматическими регуляторами, информационно-вычислительными и управляющими машинами.

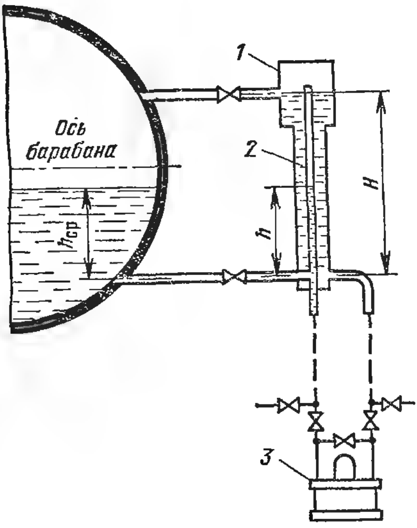


Рис. 19-2-1. Схема измерения уровня воды в барабане дифманометром с использованием двухкамерного уравнительного сосуда.

Для присоединения дифманометров-уровнемеров к барабану парогенераторов применяют специальные уравнительные сосуды различных конструкций. Расчет шкалы дифманометров-уровнемеров или их вторичных приборов обычно производят на рабочее (номинальное) давление пара в барабане с учетом типа уравнительного сосуда.

Ниже приводится методика расчета шкалы дифманометров-уровнемеров или их вторичных приборов для измерения уровня воды в барабане парогенераторов с внутрибарабанными циклонами. При расчете шкалы дифманометров-уровнемеров для измерения уровня воды в барабане при погружном дырчатом щите необходимо учитывать слой пара под щитом.

На рис. 19-2-1 показана схема измерения уровня воды в барабане парогенератора дифманометром с использованием стандартного двухкамерного уравнительного сосуда (тепловая изоляция на внешней поверхности сосуда не показана). В широкой части сосуда *1*, присоединенного к паровому пространству барабана, уровень воды (конденсата) поддерживается постоянным. В трубе *2*, присоединенной к водяному пространству барабана, уровень воды меняется при изменении уровня воды в барабане. При установке запорного вентиля на трубе, соединяющей паровое пространство барабана с уравнительным сосудом, необходимо, чтобы шпиндель его находился в горизонтальном положении. В противном случае возможно образование водяной пробки, которая может вызвать неустойчивую работу дифманометра.

Разность давлений (Па), создаваемая двухкамерным уравнительным сосудом, которую измеряет дифманометр *3*, определяется выражением

$$\Delta p = (H - h)(\rho' - \rho'')g, \qquad (19\text{-}2\text{-}1)$$

где H и h — высота столба воды в сосуде и трубе соответственно, м; ρ' и ρ'' — плотность воды и пара в состоянии насыщения при давлении p, кг/м³; g — местное ускорение свободного падения м/с².

Из уравнения (19-2-1) следует, что при верхнем уровне воды в барабане $h = H$ и любом давлении пара в барабане $\Delta p_в = 0$, а при нижнем уровне воды в барабане $h = 0$ и

$$\Delta p_н = H(\rho' - \rho'')g$$

или

$$\Delta p_н = 0{,}102H(\rho' - \rho'')g, \qquad (19\text{-}2\text{-}2)$$

где 0,102 — множитель для перевода значения $\Delta p_н$, выраженного в Па, в значение, выраженное в кгс/м².

Значение $\Delta p_в$ при верхнем уровне воды в барабане ($h = H$) соответствует на шкале вторичного прибора дифманометра нижнему пределу измерения $+N$ (например, +315 мм). Значение $\Delta p_н$ при нижнем уровне воды в барабане ($h = 0$) соответствует на шкале прибора верхнему пределу измерения $-N$ (например, —315 мм).

Разность давлений Δp_x, соответствующая отметкам шкалы вторичного прибора дифманометра N_x (0, ±100, ±200, ±300 мм) внутри диапазона измерения от $+N$ (+315 мм) до $-N$ (—315 мм), определяется выражением

$$\Delta p_x = 0{,}5\left(\Delta p_н - \Delta p_н \frac{\pm N_x}{|N|}\right). \qquad (19\text{-}2\text{-}3)$$

Значение N_x в миллиметрах берется со знаком плюс или минус. Измеряемый уровень воды в барабане выше нормального или среднего (средний уровень соответствует на шкале прибора отметке $N_x = 0$) имеет знак плюс, а ниже — знак минус.

Пример 1. Произведем расчет шкалы вторичного прибора дифманометра-уровнемера, работающего с двухкамерным уравнительным сосудом. Абсолютное давление пара в барабане парогенератора $p = 100$ кгс/см² (10 МПа). Шкала вторичного прибора $N = \pm 315$ мм. Измеряемая высота столба воды в широком сосуде $H = 2|N| \cdot 10^{-3} = 0{,}630$ м. Заданы также значения $g = 9{,}8155$ м/с² (для Москвы), $\rho' = 691{,}66$ кг/м³ и $\rho'' = 54{,}229$ кг/м³ [63]. Пользуясь формулой (19-2-2), находим значение $\Delta p_н$:

$$\Delta p_н = 0{,}102 \cdot 0{,}63\,(691{,}66 - 54{,}229) \cdot 9{,}8155 = 402 \text{ кгс/м}^2.$$

Определяем, пользуясь уравнением (19-2-3), значения Δp_x для различных отметок шкалы прибора:

Δp, кгс/м²	0	9,6	73,4	137,2	201	264,8	328,6	392,4	402
N_x, мм	315	300	200	100	0	—100	—200	—300	—315

Следует иметь в виду, что вследствие охлаждения воды в двухкамерном уравнительном сосуде, которое происходит и при наличии тепловой изоляции, на внешней поверхности его действительная средняя плотность воды в сосуде $\rho_в$ несколько

больше, чем плотность воды в состоянии насыщения ρ', принимаемая при расчете шкалы прибора. Поэтому уровень, показываемый вторичным прибором дифманометра, будет занижен по сравнению с действительным уровнем воды в барабане.

Как видно из (19-2-1), показания уровнемера зависят от разности плотностей воды и пара ($\rho'-\rho''$), которая значительно изменяется с давлением пара в барабане парогенератора. Вследствие этого дифманометры-уровнемеры с использованием двухкамерного уравнительного сосуда не могут обеспечить надежный контроль

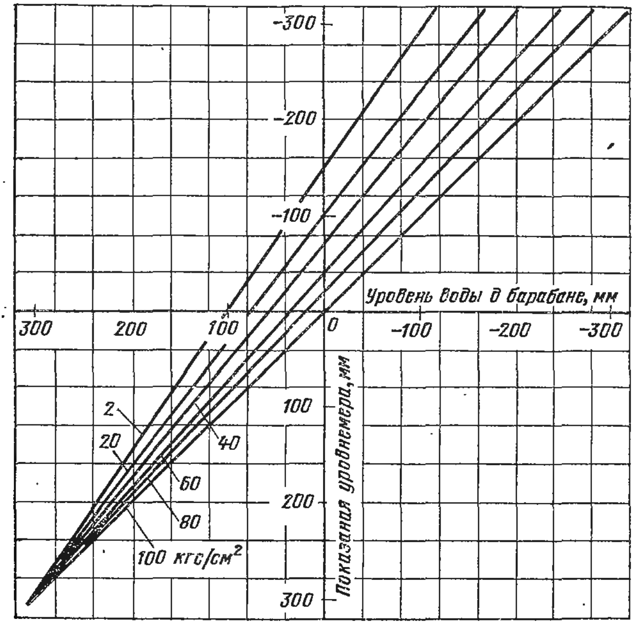


Рис. 19-2-2. Изменение показаний уровнемера (рис. 19-2-1) при отклонении давления пара в барабане от номинального.

уровня воды в барабане парогенераторов высокого давления при работе его с давлением пара ниже номинального, а также при пусках и остановах парогенераторов. Изменения показаний уровнемера при изменении абсолютного давления пара в барабане парогенератора от 100 кгс/см² (10 МПа), принятого при расчете шкалы вторичного прибора дифманометра, до 2 кгс/см² (0,2 МПа) (без учета влияния охлаждения воды в сосуде) представлены на рис. 19-2-2.

Рассмотрим схему измерения уровня воды в барабане парогенератора дифманометром с использованием однокамерного уравнительного сосуда (рис. 19-2-3). Уравнительные сосуды этого типа применяют на парогенераторах с давлением пара в барабане $p \leqslant 160$ кгс/см² (16 МПа).

Как видно из рис. 19-2-3, в сосуде *1*, присоединенном к паровому пространству барабана, уровень воды (конденсата) поддерживается постоянным. Этот сосуд и трубу *2* применяют без покрытия тепловой изоляцией. Труба *3* непосредственно присоединена к водяному пространству барабана. Разность давлений (Па), создавае-

мая уравнительным сосудом, которую измеряет дифманометр 4, определяется выражением

$$\Delta p = [H\rho_в - h\rho' - (H - h)\rho'']g,$$

или

$$\Delta p = [H(\rho_в - \rho'') - h(\rho' - \rho'')]g, \qquad (19\text{-}2\text{-}4)$$

где $\rho_в$ — плотность воды столба H, кг/м³.

Пользуясь уравнением (19-2-4), определяем разность давлений $\Delta p_в$, которую измеряет дифманометр при верхнем уровне воды в барабане $h = H$:

$$\Delta p_в = H(\rho_в - \rho')g, \qquad (19\text{-}2\text{-}5)$$

разность давлений, измеряемую дифманометром при нижнем уровне воды в барабане $h = 0$:

$$\Delta p_н = H(\rho_в - \rho'')g. \qquad (19\text{-}2\text{-}6)$$

Разность давлений Δp_x, соответствующая отметкам шкалы дифманометра или вторичного прибора N_x внутри диапазона измерения от $+N$ (+315 мм) до $-N$ (—315 мм), определяется по формуле

$$\Delta p_x = 0{,}5\left[\Delta p_н + \Delta p_в - (\Delta p_н - \Delta p_в)\frac{\pm N_x}{|N|}\right]. \qquad (19\text{-}2\text{-}7)$$

Значение N_x в миллиметрах берется со знаком плюс или минус. Измеряемый уровень воды в барабане выше нормального ($N_x = 0$) имеет знак плюс, а ниже — знак минус.

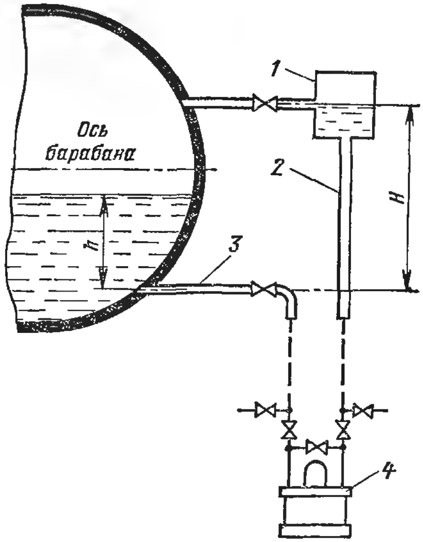


Рис. 19-2-3. Схема измерения уровня воды в барабане дифманометром с использованием однокамерного уравнительного сосуда.

П р и м е р 2. Произведем расчет шкалы вторичного прибора дифманометра с использованием однокамерного уравнительного сосуда. Абсолютное давление пара в барабане парогенератора $p = 160$ кгс/см² (16 МПа). Шкала уровнемера $N = \pm 315$ мм. Высота столба воды в сосуде *1* и трубе *2* $H = 2|N| \cdot 10^{-3} = 0{,}630$ м. Заданы значения $g = 9{,}8155$ м/с² (для Москвы); $\rho' = 590{,}53$ кг/м³; $\rho'' = 103{,}79$ кг/м³; $\rho_в = 1005{,}3$ кг/м³ (при $p = 160$ кгс/см³ и $t = 20$°C).

Пользуясь формулами (19-2-5) и (19-2-6), находим значения $\Delta p_в$ и $\Delta p_н$ (множитель 0,102 введен для перевода значений Δp в Па в значения, выраженные в кгс/м²):

$$\Delta p_в = 0{,}102 \cdot 0{,}63\,(1005{,}3 - 590{,}53) \cdot 9{,}8155 = 261{,}6 \text{ кгс/м}^2;$$

$$\Delta p_н = 0{,}102 \cdot 0{,}63\,(1005{,}3 - 103{,}79) \cdot 9{,}8155 = 568{,}6 \text{ кгс/м}^2.$$

Определяем, пользуясь уравнением (19-2-7), значения Δp_x для отметок шкалы прибора N_x:

Δp, кгс/м²	261,6	268,9	317,6	366,4	415,1	463,8	512,6	561,3	568,6
N_x, мм	315	300	200	100	0	—100	—200	—300	—315

Рисунок 19-2-4 иллюстрирует возможные изменения (завышения) показаний уровнемера при изменении абсолютного давления пара в барабане от 160 кгс/см² (16 МПа), принятого при расчете шкалы прибора, до 2 кгс/см² (0,2 МПа). Рассмотренный способ измерения уровня воды в барабане парогенератора не обеспечивает необходимой точности при значительном изменении давления пара в барабане от номинального значения, а также при пусках и остановках парогенераторов.

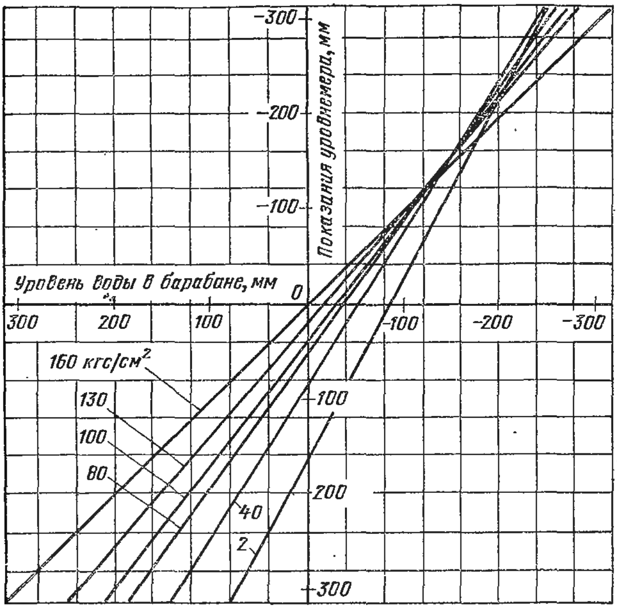


Рис. 19-2-4. Изменение показаний уровнемера (рис. 19-2-3) при отклонении давления пара в барабане от номинального.

При использовании однокамерного сосуда для присоединения дифманометра к барабану на парогенераторах с номинальным давлением пара в барабане $p \leqslant 40$ кгс/см² (4 МПа) возможные изменения (завышения) показаний уровнемера находятся в допустимых пределах. На парогенераторах с давлением пара в барабане более 45 кгс/см² (4,5 МПа) однокамерный уравнительный сосуд применять нецелесообразно.

На рис. 19-2-5 представлена схема измерения уровня дифманометром с использованием комбинированного двухкамерного уравнительного сосуда (тепловая изоляция на внешней поверхности сосуда не показана). Этот уравнительный сосуд применяют на парогенераторах с давлением пара в барабане $p \leqslant 250$ кгс/см² (25 МПа). Комбинированный уравнительный сосуд отличается от двухкамерного сосуда (см. рис. 19-2-1) тем, что нижняя часть столба воды H высотою h_1 находится в холодном состоянии, так как труба *1* не

покрывается тепловой изоляцией. Высоту h_1, измеряемую от центра отверстия в сосуде до центра трубы 2, принимают равной [1]:

$$h_1 = 1{,}222\,(H - h_{ср}). \qquad (19\text{-}2\text{-}8)$$

Это дает возможность значительно повысить надежность измерения среднего уровня при изменении давления пара в барабане в широких пределах.

Разность давлений (Па), создаваемая комбинированным уравнительным сосудом, которую измеряет дифманометр, определяется по формуле

$$\Delta p = [(H - h_1)\,\rho' + h_1\rho_в - h\rho' - (H - h)\,\rho'']\,g,$$

или

$$\Delta p = [(H - h)\,(\rho' - \rho'') + h_1\,(\rho_в - \rho')]\,g. \qquad (19\text{-}2\text{-}9)$$

Пользуясь этим уравнением, определяем разность давлений $\Delta p_в$, измеряемую дифманометром, при верхнем уровне воды в барабане $h = H$:

$$\Delta p_в = h_1\,(\rho_в - \rho')\,g. \qquad (19\text{-}2\text{-}10)$$

При нижнем уровне воды в барабане $h = 0$ выражение (19-2-9) принимает вид:

$$\Delta p_н = [H\,(\rho' - \rho'') + h_1\,(\rho_в - \rho')]\,g. \qquad (19\text{-}2\text{-}11)$$

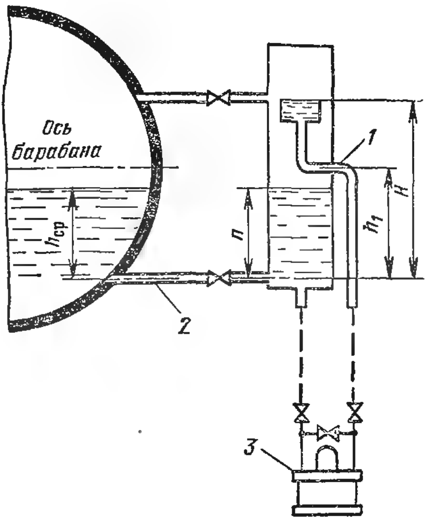


Рис. 19-2-5. Схема измерения уровня воды в барабане дифманометром с использованием комбинированного двухкамерного уравнительного сосуда.

Разность давлений Δp_x, соответствующая отметкам шкалы вторичного прибора дифманометра N_x (например, ±100, ±200, ±300 мм и 0) внутри диапазона измерения от N (+315 мм) до N (—315), определяется по формуле (19-2-7).

П р и м е р 3. Произведем расчет шкалы вторичного прибора дифманометра, работающего с комбинированным уравнительным сосудом. Абсолютное давление пара в барабане парогенератора $p = 160$ кгс/см² (16 МПа). Шкала вторичного прибора $N = \pm 315$ мм. Значение $H = 2|N| \cdot 10^{-3} = 0{,}630$ м. Значение $g = 9{,}8155$ м/с² (для Москвы). Значение h_1 определяется по формуле (19-2-8): $h_1 = 1{,}222 \cdot 315 \cdot 10^{-3} = 0{,}385$ м. Заданы значения $\rho' = 590{,}53$ кг/м³; $\rho'' = 103{,}79$ кг/м³; $\rho_в = 1005{,}3$ кг/м³.

Пользуясь формулами (19-2-10) и (19-2-11), находим значения $\Delta p_в$ и $\Delta p_н$ (множитель 0,102 введен для перевода значений Δp в Па в значения, выраженные в кгс/м²):

$$\Delta p_в = 0{,}102 \cdot 0{,}385\,(1005{,}3 - 590{,}53) \cdot 9{,}8155 = 159{,}878 = 159{,}9 \text{ кгс/м}^2;$$

$$\Delta p_н = 0{,}102 \cdot [0{,}63\,(590{,}53 - 103{,}79) + 0{,}385\,(1005{,}3 - 590{,}53)] \cdot 9{,}8155 = 467{,}084 = 467{,}1 \text{ кгс/м}^2.$$

---

[1] Унифицированные схемы импульсных линий КИПиА тепловых электростанций. Л., Оргэнергострой, 1973.

Определяем, пользуясь формулой (19-2-7), значения Δp_x для отметок шкалы прибора N_x:

Δp, кгс/м²	159,9	167,2	216,0	264,7	313,5	362,2	411,0	459,8	467,1
N_x, мм	315	300	200	100	0	—100	—200	—300	—315

Найденные расчетом возможные изменения показаний уровнемера при отклонении давления пара в барабане парогенератора от номинального значения 160 кгс/см² (16 МПа), принятого при расчете шкалы прибора, до 2 кгс/см² (0,2 МПа) представлены на рис. 19-2-6.

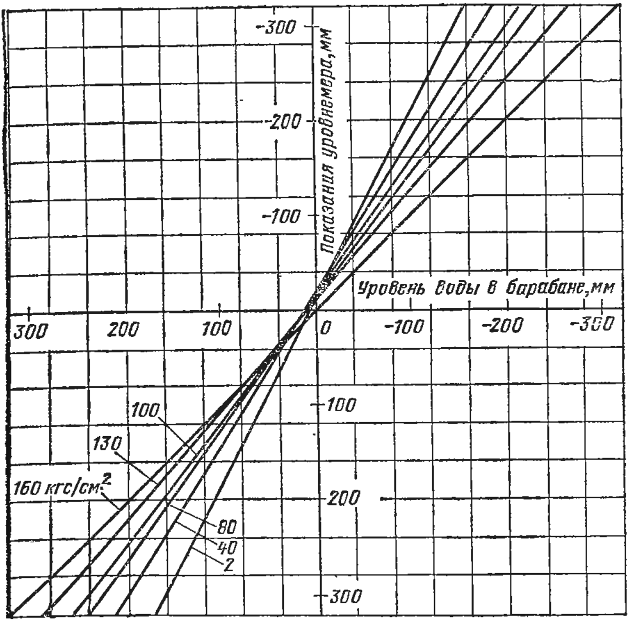


Рис. 19-2-6. Изменение показаний уровнемера (рис. 19-2-5) при отклонении давления пара в барабане от номинального (H = 630 мм).

Необходимо также иметь в виду, что вследствие охлаждения воды в комбинированном уравнительном сосуде, которое происходит и при наличии тепловой изоляции, действительная средняя плотность воды столба h будет немного больше, чем значение плотности воды в состоянии насыщения, принимаемое при расчете шкалы прибора. Поэтому показания уровнемера будут занижены несколько больше, чем указано выше.

Если принять значение $h_1 = 1{,}26 \cdot 315 = 397$ мм, то в этом случае отклонение давления пара в барабане парогенератора от номинального значения 160 кгс/см², принятого при расчете шкалы вторичного прибора дифманометра, до 2 кгс/см² приводит к занижению показаний среднего уровня воды в барабане уровнемером на —8, —13, —15, —15 мм; при давлениях пара соответственно 130, 100, 80 и 40 кгс/см² — к завышению на 0,6 мм. В этом случае погрешность измерения среднего уровня воды в барабане будет меньше, чем при $h_1 = 385$ мм.

С целью повышения точности измерения уровня воды в барабане парогенераторов были предложены кроме рассмотренных уравни-

тельных сосудов и другие их варианты, например с паровым обогревом, а также уровнемеры с коррекцией по давлению, температуре и разности плотностей воды и пара [79, 80].

Все типы уравнительных сосудов, применяемых для измерения уровня воды в барабане парогенераторов с помощью дифманометра, позволяют обеспечить надежный контроль его в широком диапазоне (от +315 до —315 мм) только при номинальном значении давления пара при соблюдении определенных условий. Уровнемеры, работающие с этими уравнительными сосудами при меняющемся давлении пара в барабане парогенераторов в широком интервале (от номинального значения до 2 кгс/см²), имеют ограниченную погрешность только в области одного фиксированного значения уровня (рис. 19-2-2, 19-2-4, 19-2-6).

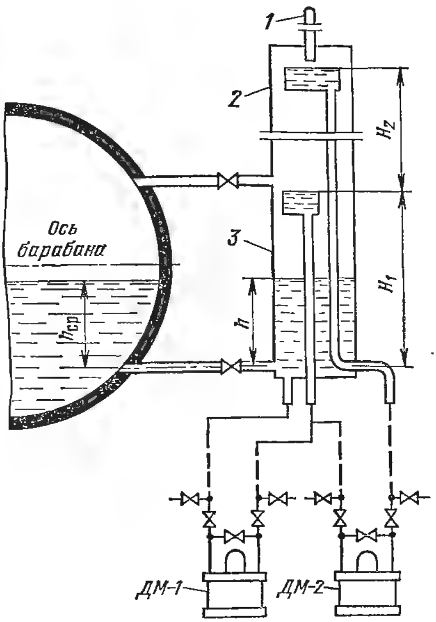


Рис. 19-2-7. Схема измерения уровня воды в барабане уровнемером с коррекцией по разности плотностей воды и пара.

1 — труба-конденсатор; *2* — верхняя часть уравнительного сосуда для измерения $\rho' - \rho''$; *3* — нижняя часть уравнительного сосуда для измерения уровня воды в барабане h.

Коррекция по давлению (или температуре) не обеспечивает достаточной точности измерения уровня воды в барабане мощных парогенераторов при меняющихся давлениях пара в широких пределах, так как изменение разности плотностей воды и пара $\rho' - \rho''$ не является линейной функцией давления (или температуры) пара в барабане.

Уровнемер с коррекцией по разности плотностей воды и пара позволяет с достаточной точностью измерять уровень воды в барабане при отклонении давления пара от номинального значения в широких пределах, а также при пусках и остановах парогенераторов. Для такого уровнемера на Литовской ГРЭС был разработан специальный сдвоенный двухкамерный уравнительный сосуд (схема которого показана на рис. 19-2-7), позволяющий присоединять два дифманометра: один для измерения уровня воды в барабане, а второй (корректирующий) для измерения разности плотностей воды и пара $\rho' - \rho''$. Передающие преобразователи дифманометров включаются в измерительную схему вторичного прибора, выполненного на базе прибора ДСР, у которого вместо дифференциально-трансформаторного преобразователя установлен реохорд и изменена

измерительная схема. Такая измерительная схема требует индивидуальной регулировки и градуировки комплекта.

Более рационально для уровнемера с коррекцией по $\rho' - \rho''$ использовать взаимозаменяемые дифманометры типа ДМЭ с выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА (гл. 12).

Рассмотрим более подробно схему измерения уровня воды в барабане парогенератора с использованием сдвоенного двухкамерного уравнительного сосуда (рис. 19-2-7). К нижней части уравнительного сосуда присоединен дифманометр *ДМ-1*, который измеряет уровень воды в барабане. К верхней части сосуда присоединен дифманометр *ДМ-2*, измеряющий разность плотностей воды и пара ($\rho' - \rho''$). Оба дифманометра подключают к вторичному прибору, устанавливаемому на щите парогенератора или блока.

Разность давлений, создаваемая нижней частью уравнительного сосуда, которую измеряет дифманометр *ДМ-1*, определяется выражением

$$\Delta p_1 = (H_1 - h)(\rho' - \rho'')g. \tag{19-2-12}$$

Разность давлений Δp_2, создаваемая верхней частью сосуда и измеряемая дифманометром *ДМ-2*, пропорциональна разности плотностей воды и пара $\rho' - \rho''$:

$$\Delta p_2 = H_2(\rho' - \rho'')g. \tag{19-2-13}$$

В уравнениях (19-2-12) и (19-2-13) обозначения соответствуют принятым на рис. 19-2-7. Для рассматриваемого уравнительного сосуда значение $H_2 = H_1$.

Для уменьшения влияния на показания уровнемера охлаждения воды в сдвоенном двухкамерном уравнительном сосуде его полностью покрывают тепловой изоляцией, а поддержание постоянства высот столбов воды H_1 и H_2 обеспечивается конденсацией пара в дополнительной трубе-конденсаторе, не покрытой тепловой изоляцией. Однако и при наличии тепловой изоляции происходит охлаждение воды в нижней половине уравнительного сосуда, что будет вызывать изменения показаний дифманометра *ДМ-1*, а следовательно, и уровнемера.

Для устранения этого недостатка, приводящего к снижению точности измерения уровня воды в барабане парогенераторов, можно осуществить вместо тепловой изоляции паровой обогрев уравнительного сосуда или использовать внутрибарабанный уравнительный сосуд [81]. Схема измерения уровня с использованием внутрибарабанного сосуда показана на рис. 19-2-8. Разность давлений, создаваемая этим сосудом и измеряемая дифманометром *ДМ-1*, определяется выражением (19-2-12). В этом случае внешний двухкамерный сосуд, покрытый тепловой изоляцией, служит только для измерения разности плотностей воды и пара с помощью дифманометра *ДМ-2*. Значения $H_1 = H_2$ выбирают в зависимости от диапазона измерения уровня воды в барабане парогенераторов.

Схема уровнемера с коррекцией по разности плотностей ($\rho' - \rho''$) с использованием дифманометров типа ДМЭ и вторичного прибора, выполненного на базе автоматического потенциометра типа КСП2 с сигнальным устройством, приведена на рис. 19-2-9, где *ДМ-1* и *ДМ-2* — дифманометры, измеряющие соответственно уровень воды в барабане и разность плотностей воды и пара; $R_л$ — сопротивление линии связи; *ВП* — вторичный прибор; $R_{н.р}$ — реохорд, нормированное сопротивление которого равно $100 \pm \pm 0{,}1$ Ом; $R_п$ — резистор для установки значения компенсирующего напряжения на реохорде, пропорционального разности плотностей воды и пара; $R_у$ — калиброванный резистор, напряжение на котором пропорционально измеряемому уровню воды в барабане парогенератора; R_1 и R_2 — резисторы для доведения сопротивления нагрузки, подключаемой на выходе дифманометров, до номинального значения.

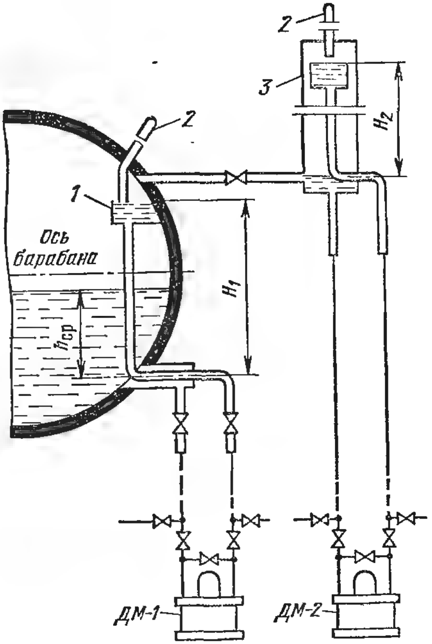


Рис. 19-2-8. Схема измерения уровня воды в барабане уровнемером с коррекцией по $\rho' - \rho''$ и с использованием внутрибарабанного уравнительного сосуда.

1 — внутрибарабанный уравнительный сосуд; *2* — труба-конденсатор; *3* — уравнительный сосуд для измерения $\rho' - \rho''$.

Значения выходных токов I_1 и I_2 дифманометров *ДМ-1* и *ДМ-2* пропорциональны соответственно Δp_1 (19-2-12) и Δp_2 (19-2-13):

$$I_1 = \kappa_1 \Delta p_1; \quad (19\text{-}2\text{-}14)$$

$$I_2 = \kappa_2 \Delta p_2, \quad (19\text{-}2\text{-}15)$$

где κ_1 и κ_2 — коэффициенты передачи дифманометров.

Напряжение $U_у$, пропорциональное измеряемому уровню воды в барабане, с учетом выражения (19-2-14) равно:

$$U_у = I_1 R_у = \kappa_1 R_у \Delta p_1, \quad (19\text{-}2\text{-}16)$$

где $R_у = R'_у + r_у$.

Компенсирующее напряжение $U_р$, пропорциональное измеряемой разности плотностей ($\rho' - \rho''$), определяется по формуле

$$U_р = I_2 R_{пр} (1 - 2\lambda)$$

или с учетом (19-2-15)

$$U_р = \kappa_2 R_{пр} (1 - 2\lambda) \Delta p_2, \quad (19\text{-}2\text{-}17)$$

где λ — нерабочий участок реохорда; $R_{пр}$ — приведенное сопротивление реохорда.

Для каждого значения напряжения $U_у$ можно найти такое положение движка реохорда, при котором компенсирующее напряжение $mU_р$ равно $U_у$. Здесь $m = l_1/l$; l_1 — длина рабочего участка реохорда левее движка; l — полная рабочая длина реохорда. При достижении полной компенсации напряжения $U_у$ напряжением $mU_р$ движок реохорда и каретка с указателем и пером займут положение,

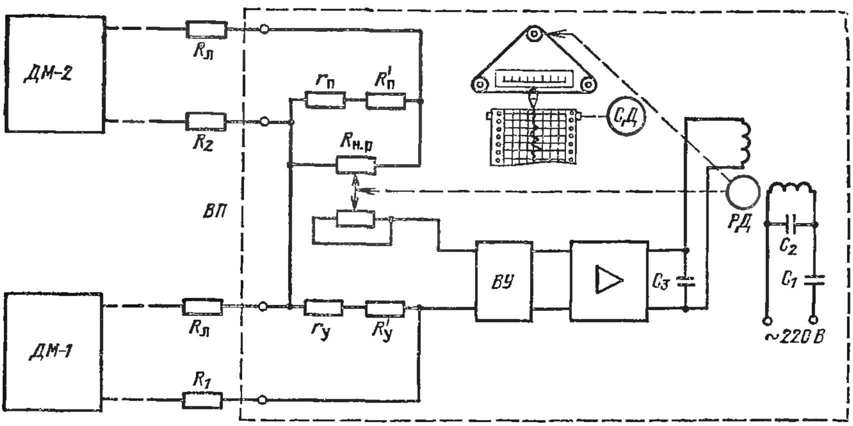


Рис. 19-2-9. Измерительная схема уровнемера с коррекцией по разности плотностей воды и пара.

соответствующее измеряемому отношению $U_у/U_р$. В этом случае с учетом (19-2-16) и (19-2-17) имеем:

$$m = \frac{U_у}{U_р} = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \frac{R_у}{R_{пр}(1-2\lambda)} \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}. \qquad (19\text{-}2\text{-}18)$$

Принимая $R_у = R_{пр}(1 - 2\lambda)$, $\kappa_1 = \kappa_2$ и учитывая (19-2-12) и (19-2-13), получаем:

$$m = \frac{U_у}{U_р} = \frac{H_1 - h}{H_2}.$$

Если принять $H_1 = H_2 = 630$ мм, а диапазон измерения вторичного прибора $N = \pm 315$ мм, то при $h = H_1$ значение $m = 0$ и вторичный прибор будет показывать $+315$ мм; при $h = H_1/2$ значение $m = 0{,}5$, в этом случае указатель вторичного прибора установится на отметке 0, что соответствует среднему (нормальному) уровню воды в барабане; при $h = 0$ значение $m = 1$ и вторичный прибор будет показывать (—315) мм. Приведенные значения m, а вместе с тем и показания уровнемера не зависят от изменения давления пара в барабане.

Погрешность измерения уровня воды в барабане парогенераторов уровнемером с коррекцией по разности плотностей $(\rho' - \rho'')$

с использованием внутрибарабанного и двухкамерного уравнительных сосудов (рис. 19-2-8) будет меньше, чем погрешность измерения уровнемера с использованием сдвоенного двухкамерного уравнительного сосуда. При оценке погрешности измерения уровня воды в барабане уровнемеров с использованием сдвоенного двухкамерного уравнительного сосуда (рис. 19-2-7) необходимо учитывать также изменение показаний уровнемера вследствие охлаждения воды в нижней половине сосуда. Эти изменения показаний уровнемера могут быть определены с достаточной точностью только опытным путем. Следует при этом отметить, что погрешность измерения уровня воды в барабане парогенераторов этим уровнемером с учетом охлаждения воды в сосуде будет значительно меньше, чем при использовании уровнемеров без коррекции по разности плотностей воды и пара.

Пример 4. Рассчитаем элементы измерительной схемы вторичного прибора уровнемера (рис. 19-2-9) и шкалу его при следующих исходных данных:

Предельный номинальный перепад давления дифманометров $\Delta p = 630$ кгс/м².

Предельное допускаемое рабочее избыточное давление дифманометров $p = 250$ кгс/см².

Номинальное значение выходного тока дифманометром при $\Delta p = 630$ кгс/м² $I_1 = I_2 = 5$ мА.

Номинальное значение сопротивления нагрузки, подключаемой на выход дифманометров, с учетом сопротивления линии связи $R_н = 2,5$ кОм.

Нормированное значение сопротивления реохорда вторичного прибора $R_{н.р} = 100 \pm 0,1$ Ом.

Нерабочие участки реохорда ($\lambda = 0,025$) $2\lambda = 0,05$.

Максимальное падение напряжения на рабочем участке реохорда и калиброванном резисторе $R_у$ при $I_1 = I_2 = 5$ мА $U_р = U_{макс} = 10$ мВ.

Шкала прибора $N = \pm 315$ мм, длина шкалы 160 мм.

Пользуясь формулой (4-19-4), определяем $R_п$:

$$R_п = \frac{R_{н.р} U_р}{I_2 R_{н.р}(1-2\lambda) - U_р} = \frac{100 \cdot 10}{5 \cdot 100 \cdot 0,95 - 10} = \frac{1000}{465} = 2,1505 \text{ Ом}.$$

Принимаем $R_п = 2 \pm 0,1$ Ом и $r_п = 0,4$ Ом.

Определим приведенное сопротивление реохорда $R_{пр}$:

$$R_{пр} = \frac{100 \cdot 2,1505}{100 + 2,1505} = \frac{215,05}{102,1505} = 2,1052 \text{ Ом}.$$

Произведем проверку правильности определения $R_{пр}$ по формуле (4-19-2):

$$U_р = I_2 R_{пр}(1-2\lambda) = 5 \cdot 2,1052 \cdot 0,95 = 9,9997 = 10 \text{ мВ}.$$

Значение $R_у$ принимаем равным:

$$R_у = R_{пр}(1-2\lambda) = 2,1052 \cdot 0,95 = 1,99994 = 2 \text{ Ом},$$

или

$$R_у = 2 \pm 0,1 \text{ Ом} \quad \text{и} \quad r_у = 0,3 \text{ Ом}.$$

Сопротивление линии связи $R_л = 15$ Ом.

Сопротивление резисторов R_1 и R_2 принимаем равным:

$$R_1 = R_2 = 2480 \pm 2 \text{ Ом}.$$

Шкала вторичного прибора уровнемера и данные для его поверки, которая производится после подгонки сопротивлений измерительной схемы, приведены в табл. 19-2-1. При расчете значений m и $U_у$ принимались $I_2 = 5$ мА, $U_р = 10$ мВ,

Таблица 19-2-1

Шкала вторичного прибора уровнемера с коррекцией по разности плотностей воды и пара

$\pm N$, мм	+315	+300	+200	+100	0	−100	−200	−300	−315
m	0	0,0238	0,1826	0,3412	0,5	0,6588	0,8174	0,9762	1
$U_у$, мВ	0	0,238	1,826	3,412	5	6,588	8,174	9,762	10
I_1, мА	0	0,119	0,913	1,706	2,5	3,294	4,087	4,881	5

$R_у = R_{пр}(1-2\lambda) = 2$ Ом, а приведенные значения тока I_1 соответствуют перепадам давления дифманометра *ДМ*-1: 15, 115, 215, 315, 415, 515, 615 и 630 кгс/м². Шкала вторичного прибора равномерная.

19-3. Измерение уровня жидкостей в конденсаторах, подогревателях и баках с помощью дифманометров

Измерение уровня воды в конденсаторе паровых турбин. Измерение уровня конденсата (воды) в конденсаторе турбин имеет важное значение при их эксплуатации. Повышение уровня воды в конденсаторе приводит к затоплению нижних рядов охлаждающих труб, что вызывает переохлаждение конденсата. Значительное понижение уровня конденсата ухудшает работу конденсатного насоса вследствие уменьшения подпора со стороны всасывающей трубы насоса.

Для большей надежности контроль уровня воды в конденсаторе турбин осуществляется по месту и дистанционно. Контроль уровня по месту производят с помощью водоуказательного стекла или показывающего уровнемера, устанавливаемого в первом случае непосредственно на конденсаторе, а во втором — вблизи него. Для дистанционного измерения уровня воды в конденсаторе применяют уровнемеры-дифманометры, снабженные преобразователем с выходным электрическим сигналом. Вторичные показывающие приборы уровнемеров устанавливаются на щите управления турбины или блока. Показывающие приборы должны быть снабжены контактным устройством для сигнализации повышения и понижения уровня в конденсаторе.

Схема измерения уровня воды в конденсаторе турбины по разности давлений с помощью дифманометра (типа ДМ и др.) с использованием однокамерного уравнительного сосуда приведена на рис. 19-3-1. Уравнительный сосуд *3* соединен посредством трубы *2* с паровым пространством конденсатора *1*, а труба *6* присоединена ко всасывающей трубе конденсатного насоса. По трубе *4* через ограничительную диафрагму *5* непрерывно поступает в небольшом

количестве конденсат из напорной линии конденсатного насоса. Благодаря этому уровень воды в сосуде 3 поддерживается постоянным, так как подаваемый в него конденсат полностью восполняет убыль воды из сосуда вследствие испарения ее. Если окажется небольшой избыток конденсата, то он будет стекать в конденсатор по трубе 2.

Рассмотренный уравнительный сосуд применяют без покрытия его тепловой изоляцией, и температура конденсата в конденсаторе очень мало отличается от температуры воздуха, окружающего уравнительный сосуд.

Разность давлений Δp, создаваемая уравнительным сосудом и измеряемая дифманометром, пропорциональна уровню воды в конденсаторе:

$$\Delta p = [H\rho_{в} - h\rho_{в} - (H-h)\rho_{п}]g,$$

или

$$\Delta p = (H-h)(\rho_{в} - \rho_{п})g, \quad (19\text{-}3\text{-}1)$$

где $\rho_{в}$ — плотность воды столбов h и H, кг/м³; $\rho_{п}$ — плотность пара, кг/м³. Остальные обозначения соответствуют принятым выше и на рис. 19-3-1. Если учесть, что $\rho_{п} \ll \rho_{в}$, то (19-3-1) принимает вид:

$$\Delta p = (H-h)\rho_{в}g. \quad (19\text{-}3\text{-}2)$$

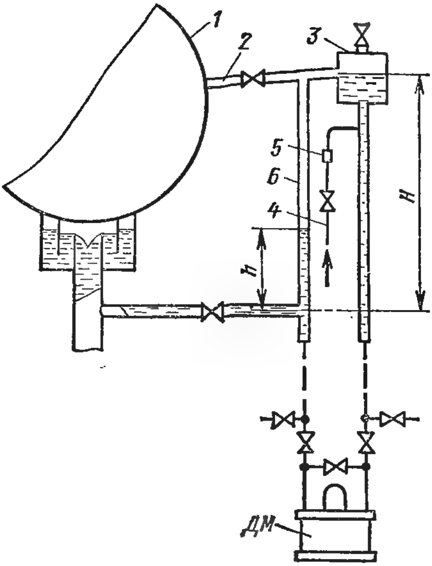


Рис. 19-3-1. Схема измерения уровня воды в конденсаторе турбины.

При верхнем уровне воды в конденсаторе $h = H$ согласно (19-3-2) получим $\Delta p_{в} = 0$. Пользуясь тем же выражением, определяем разность давлений $\Delta p_{н}$, создаваемую уравнительным сосудом и измеряемую дифманометром при нижнем уровне воды в конденсаторе $h = 0$:

$$\Delta p_{н} = H\rho_{в}g. \quad (19\text{-}3\text{-}3)$$

При расчете шкалы вторичного прибора дифманометра разность давлений Δp_x, соответствующая отметкам шкалы его внутри выбранного диапазона измерения, определяется по формуле (19-2-3).

Измерение уровня воды в подогревателях. Контроль уровня воды (конденсата) в подогревателях высокого давления (ПВД), низкого давления (ПНД) и сетевых подогревателях паротурбинных установок имеет важное значение для обеспечения нормальной эксплуатации их. Для измерения уровня в подогревателях могут быть использованы дифманометры, снабженные преобразователями с выходным электрическим сигналом типа ДМ и др. (гл. 12). Вторич-

ные показывающие приборы к ним должны быть снабжены контактным устройством для сигнализации повышения уровня в ПВД, ПНД и сетевых подогревателях. Для контроля уровня в подогревателях также могут быть использованы дифманометры, снабженные отсчетным и контактным устройствами.

Для присоединения дифманометров к подогревателям применяют обычно однокамерные уравнительные сосуды, которые по своему устройству аналогичны уравнительному сосуду, рассмотренному выше (рис. 19-2-3). В качестве примера на рис. 19-3-2 показана схема измерения уровня конденсата греющего пара в ПВД.

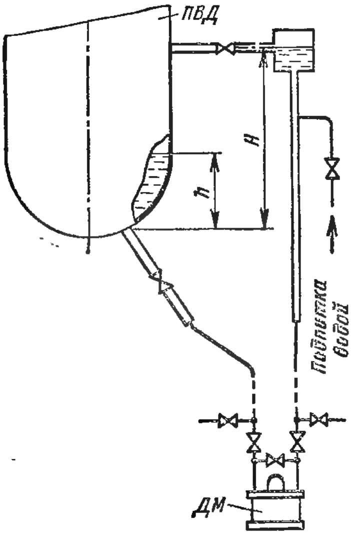


Рис. 19-3-2. Схема измерения уровня конденсата греющего пара в ПВД.

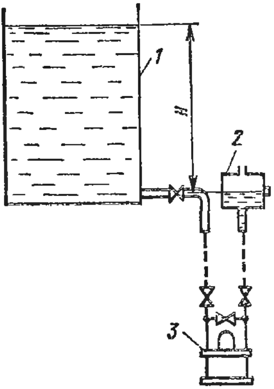


Рис. 19-3-3. Схема измерения уровня жидкости, находящейся в баке под атмосферным давлением.

Разность давлений Δp, создаваемая уравнительным сосудом и измеряемая дифманометром, пропорциональна уровню конденсата греющего пара в ПВД:

$$\Delta p = [H\rho_в - h\rho_к - (H - h)\,\rho_п]\,g,$$

или

$$\Delta p = [H\,(\rho_в - \rho_п) - h\,(\rho_к - \rho_п)]\,g, \qquad (19\text{-}3\text{-}4)$$

где $\rho_в$, $\rho_к$ и $\rho_п$ — плотность воды столба H, конденсата и пара соответственно. Остальные обозначения соответствуют принятым на рис. 19-3-2.

Расчет шкалы дифманометров-уровнемеров или их вторичных приборов производят на номинальные параметры подогревателей с учетом типа уравнительного сосуда. При измерении уровня в ПВД, ПНД и сетевых подогревателях с использованием однокамерных уравнительных сосудов необходимо иметь в виду, что отклонение

параметров от номинальных значений, для которых рассчитывалась шкала дифманометра, приводит к изменению показаний уровнемеров, так же как и при измерении уровня воды в барабане парогенераторов.

Измерение уровня жидкостей в баках, аппаратах и резервуарах. Для измерения уровня жидкостей в баках, аппаратах и резервуарах широко применяют метод измерения по разности давлений с помощью дифманометра. В зависимости от требований, предъявляемых к автоматизации технологических процессов, применяют различные типы дифманометров. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний уровня, то целесообразно применять дифманометры с отсчетным устройством (гл. 12). Эти дифманометры могут быть снабжены контактным устройством для сигнализации предельных значений уровня. Для дистанционного измерения уровня могут быть использованы дифманометры с электрическим или пневматическим выходным сигналом в комплекте с соответствующим вторичным прибором (гл. 8, 12).

Поскольку жидкость, уровень которой необходимо измерять, может находиться под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, то это необходимо учитывать при выборе типа и модели дифманометра, так как они выпускаются на различное предельно допускаемое рабочее избыточное давление. Предельный номинальный перепад давления дифманометра выбирают в зависимости от диапазона измерения уровня.

Для присоединения дифманометра к баку или другому устройству применяют различные типы уравнительных сосудов. В качестве примера на рис. 19-3-3 показана схема измерения уровня нейтральной, невязкой жидкости, находящейся в баке или резервуаре под атмосферным давлением. При измерении уровня в баке *1* должно быть обеспечено постоянство уровня в сосуде *2*, установленного при нижнем уровне жидкости в баке. Поэтому этот сосуд должен иметь такой размер, при котором можно было бы пренебречь дополнительной погрешностью дифманометра, вызываемой изменением уровня в сосуде от начального его положения при измерении уровнемером *3* верхнего уровня жидкости в баке H.

Если свойства жидкости, уровень которой необходимо измерять, не позволяют подключать дифманометр по схеме, показанной на рис. 19-3-3, необходимо вместо уравнительного сосуда применять разделительные сосуды или разделительные устройства других типов, которые должны располагаться в соединительных линиях максимально близко к баку или резервуару.

Размеры уравнительных и разделительных сосудов обычно выбирают в зависимости от объема плюсовой и минусовой камер дифманометра. При применении разделительных устройств другого типа необходимо учитывать возможное изменение показаний уровнемера.

Метод измерения уровня нейтральной, невязкой жидкости, находящейся в баке, резервуаре или аппарате под избыточным давле-

нием, в принципе аналогичен методу измерения уровня воды в барабане парогенераторов. Для присоединения дифманометра к баку или к другому устройству применяют обычно однокамерный уравнительный сосуд (рис. 19-2-3) и реже — сосуды других типов. Если в этом случае необходимо применить разделительные сосуды, то их устанавливают дополнительно в линиях дифманометра на отметке нижнего уровня.

Если при измерении уровня жидкости плотность ее может изменяться в небольших пределах, то расчет шкалы дифманометра или его вторичного прибора целесообразно производить для среднего значения плотности этой жидкости.

19-4. Измерение уровня жидкостей с помощью поплавковых и буйковых уровнемеров

Простейшим техническим средством для измерения уровня жидкости в резервуарах является поплавковый указатель уровня. Об уровне в этом случае судят по положению прикрепленного к противовесу указателя, соединенного с поплавком с помощью троса, перекинутого через блоки. Этот метод измерения позволяет контролировать уровень жидкости, находящейся в резервуаре под атмосферным давлением, в случае, когда объект расположен сравнительно недалеко от поста наблюдения.

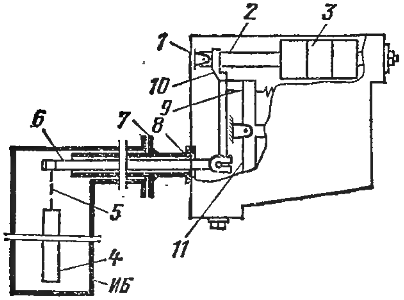


Рис. 19-4-1. Схема устройства буйкового уровнемера.

Для дистанционного измерения уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, в различных отраслях промышленности находят широкое применение буйковые уровнемеры с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0—5; 0—20 мА типа УБ-Э или пневматическим с давлением 0,2—1 кгс/см^2 (0,02—0,1 МПа) типа УБ-П.

Действие уровнемеров УБ-Э и УБ-П соответственно основано на принципе электросиловой или пневмосиловой компенсации усилия, развиваемого чувствительным элементом (буйком) измерительного блока уровнемера, погруженным в жидкость, уровень которой измеряется. В уровнемерах типа УБ-Э используется линейный преобразователь с электросиловой компенсацией ПЛЭ (рис. 8-8-1), а в уровнемерах УБ-П — преобразователь с пневмосиловой компенсацией (рис. 8-10-1).

Буйковый уровнемер, присоединенный к объекту с помощью фланца *7*, схематично показан на рис. 19-4-1. Он состоит из измерительного блока *ИБ* и преобразователя *1* с электросиловой или

пневмосиловой компенсацией. Измерительный блок, представляющий собой рычажную систему с чувствительным элементом в виде буйка *4*, взаимозаменяемым для уровнемеров типов УБ-Э и УБ-П. Буек, соединенный со стержнем *5*, подвешен к рычагу вывода *6* с помощью призмы. Выходящая часть рычага *6* из полости, находящейся под рабочим давлением, уплотнена с помощью мембраны *8*. В этих уровнемерах, так же как и в дифманометрах ДМ-Э и ДС-П (гл. 12), две упругие ленты (на рис. 19-4-1 не показаны) удерживают рычаг вывода от осевого перемещения при воздействии на мембрану рабочего давления. Такое устройство вывода обеспечивает возможность поворота рычага *6* относительно условной оси, образованной пересечением плоскостей, в которых расположены мембрана и упругие ленты. Это устройство позволяет также осуществлять регулировку положения условной оси рычага вывода. Конец рычага вывода с помощью поводка и ленточной тяги *9* соединен с рычагом *11* преобразователя *1*.

Преобразователи уровнемеров в отличие от преобразователей, рассмотренных в гл. 8, имеют дополнительный рычаг *2*, на котором расположены грузы *3*. Деталь *10* этого рычага соединена с поводком рычага вывода двумя упругими лентами (на рис. 19-4-1 не показаны). Начальная сила тяжести буйка уравновешена грузом *3*. Такое положение буйка соответствует нижнему уровню жидкости в резервуаре $h = 0$. В этом случае выходной сигнал уровнемера равен максимальному (верхнему) значению $I_{вых} = 5$; 20 мА или $p_{вых} = 1$ кгс/см². При подъеме уровня жидкости в резервуаре выходной сигнал уменьшается и при $h = H$ равен $I_{вых} = 0$ или $p_{вых} = 0{,}2$ кгс/см².

Уровнемеры УБ-Э могут работать в комплекте с миллиамперметрами КСУ2 и других типов, а также совместно с автоматическими регуляторами уровня и с информационно-вычислительными и управляющими машинами. Уровнемеры типа УБ-П применяют с любыми вторичными показывающими или самопишущими приборами, имеющими диапазон измерения 0,2—1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа), а также с пневматическими регуляторами уровня.

Уровнемеры типа УБ-Э и УБ-П могут быть использованы для измерения уровня в объектах с температурой жидкости не выше 400°С. Они выпускаются на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 64 и 100 кгс/см² (6,4 и 10 МПа). Эти уровнемеры, имеющие класс точности 1 и 1,5, изготовляют с различными размерами (диаметром и длиной) буйка, позволяющими выполнять их с диапазонами измерения, лежащими в пределах от 0—0,04 до 0—16 м.

Уровнемеры буйковые электрические типа УБ-Э выпускают также во взрывозащищенном исполнении для измерения уровня в объектах при температуре жидких сред (в том числе азотоводородных и аммиачных) от —40 до +200°С (с радиатором) и от —40 до +100°С (без радиатора). Эти модели уровнемеров, имеющие класс точности 1, изготовляют с диапазонами измерений, лежащими в пределах от 0—0,4 до 0—6 м [58].

Кроме рассмотренных уровнемеров УБ-Э и УБ-П применяют и другие типы буйковых измерителей уровня с пневматическим выходным сигналом и индикаторы уровня с дифференциально-трансформаторным преобразователем класса точности 5 [75].

Поплавковые уровнемеры с дополнительным устройством находят применение для дистанционного измерения уровня воды в открытых водоемах, напора, создаваемого разностью уровней верхнего и нижнего бьефов, и положения различного рода затворов. В уровнемерах этого типа и во вторичных приборах к ним в качестве измерительных преобразователей используются сельсины [75].

Для сигнализации предельных значений уровня жидкости в резервуарах или баках применяют поплавковые сигнализаторы уровня различных типов [75].

19-5. Емкостные уровнемеры

Общие сведения. Емкостные уровнемеры широко применяют для сигнализации и дистанционного измерения уровня однородных жидкостей в различных объектах в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности. Емкостные уровнемеры могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под давлением до 25—60 кгс/см² (2,5—6,0 МПа) и имеющих температуру от —40 до 200°С. Эти ограничения обусловлены надежностью применяемой изоляции для изготовления общепромышленных первичных преобразователей емкостных уровнемеров.

Емкостные уровнемеры не могут быть использованы для измерения уровня вязких (более 0,980 Па·с), пленкообразующих, кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей, а также взрывоопасных сред.

Действие рассматриваемых уровнемеров основано на измерении электрической емкости первичного преобразователя, изменяющейся пропорционально изменению контролируемого уровня жидкости в резервуаре. Первичный преобразователь, преобразующий изменение уровня жидкости в пропорциональное изменение емкости, представляет собой, например, цилиндрический конденсатор, электроды которого расположены коаксиально. Для каждого значения уровня жидкости в резервуаре емкость первичного преобразователя определяется как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов, один из которых образован частью электродов преобразователя и жидкостью, уровень которой измеряется, а второй — остальной частью электродов преобразователя и воздухом или парами жидкости.

При применении емкостных уровнемеров необходимо иметь в виду, что измеряемый уровень жидкости функционально связан с диэлектрической проницаемостью веществ. Поэтому при измерении уровня жидкости емкостным уровнемером следует учитывать, что значение диэлектрической проницаемости жидкости изменяется с изменением температуры ее.

В зависимости от электрических характеристик жидкости, уровень которых измеряют емкостным методом, разделяют на неэлектропроводные и электропроводные. Такое деление жидких диэлектриков имеет некоторую условность, но является практически целесо-

образным. Жидкости, имеющие удельное сопротивление $\rho > 10^7 \div 10^8$ Ом·м и относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_ж \leqslant 5 \div 6$, относятся к группе неэлектропроводных, а жидкости, имеющие $\rho \leqslant 10^5 \div 10^6$ Ом·м и $\varepsilon_ж \geqslant 7 \div 10$, относятся к группе электропроводных. Следует отметить, что удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость жидкостей в большой степени зависят от частоты напряжения, на которой производится измерение уровня. Вследствие различия электрических характеристик жидкостей емкостные преобразователи уровнемеров выполняют различными. Принципиальное различие состоит в том, что один из электродов преобразователя для измерения уровня электропроводных жидкостей покрывается электрической изоляцией, а электроды преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолируют.

Некоторые типы емкостных уровнемеров находят применение для сигнализации и дистанционного измерения уровня сыпучих тел с постоянной влажностью.

Емкостный преобразователь для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей. Эти преобразователи емкостных уровнемеров выполняют цилиндрического и пластинчатого типа, а также в виде жесткого стержня или троса. В последнем случае вторым электродом служит металлическая стенка резервуара. Для обеспечения постоянства характеристик преобразователя и повышения точности измерения уровня целесообразно применять преобразователи со стержнем или тросом, располагаемым в стальной трубе, являющейся вторым электродом преобразователя.

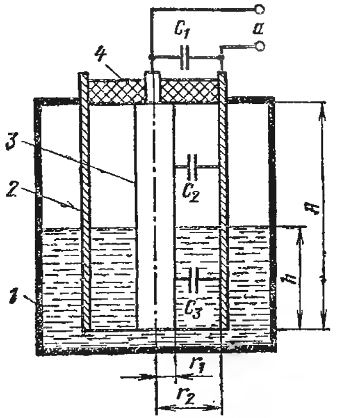


Рис. 19-5-1. Схема устройства емкостного преобразователя для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей.

Рассмотрим приведенную на рис. 19-5-1 схему устройства емкостного преобразователя уровнемера, выполненного в виде цилиндрического конденсатора из двух коаксиально расположенных стальных труб *2* и *3*. Для большей наглядности преобразователь погружен в резервуар *1*, в котором производится измерение уровня жидкости.

Емкость преобразователя C_{0a}, измеренная на зажимах *a*, когда между электродами *2* и *3* на рабочем их участке высотою *H* находится воздух, определяется выражением

$$C_{0a} = C_1 + C_{0п}, \tag{19-5-1}$$

где C_1 — емкость проходного изолятора *4* и соединительного кабеля, значение которой не зависит от среды, находящейся между элект-

родами *2* и *3*, Ф; $C_{0п}$ — начальная емкость преобразователя на рабочем его участке высотою H, заполненном воздухом, для которого можно принять относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_в = 1$, Ф, согласно формуле

$$C_{0п} = \frac{2\pi\varepsilon_0 H}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; \tag{19-5-2}$$

здесь ε_0 — электрическая постоянная или абсолютная диэлектрическая проницаемость свободного пространства ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); r_1 и r_2 — радиусы соответственно электродов *3* и *2*, м.

Если конденсатор преобразователя на участке высотою h заполнен жидкостью, уровень которой измеряется, а на участке $H - h$ — воздухом и парами этой жидкости, то емкость преобразователя на зажимах a определяется выражением

$$C_{пa} = C_1 + C_п = C_1 + C_2 + C_3, \tag{19-5-3}$$

где $C_п = C_2 + C_3$ — емкость преобразователя; C_2 — емкость преобразователя на участке высотою $H - h$, заполненном воздухом и парами жидкости с относительной диэлектрической проницаемостью ε_2, согласно формуле

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_2 (H - h)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; \tag{19-5-4}$$

C_3 — емкость преобразователя на участке высотою h, заполненном жидкостью с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_ж$, согласно формуле

$$C_3 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_ж h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \tag{19-5-5}$$

Учитывая (19-5-2), (19-5-4) и (19-5-5), уравнение (19-5-3) можно представить в виде

$$C_{пa} = C_1 + C_{0п}\left[\varepsilon_2 + (\varepsilon_ж - \varepsilon_2)\frac{h}{H}\right]. \tag{19-5-6}$$

Из этого выражения следует, что при нормальных условиях измерения

$$C_{пa} = f\left(\frac{h}{H}\right).$$

Для обеспечения однозначной зависимости этой функции при измерении уровня жидкости в рабочих условиях эксплуатации необходимо иметь постоянство значений C_1, ε_2 и $\varepsilon_ж$. Постоянство значения C_1 в необходимых пределах обеспечивается благодаря применению изоляционных материалов и кабеля с малым температурным коэффициентом электрической емкости. Изменением значения ε_2 можно пренебречь, так как для большинства газов и паров

жидкостей, уровень которых измеряют емкостным методом, относительная диэлектрическая проницаемость ε_2 незначительно отличается от единицы и поэтому можно принять $\varepsilon_2 = 1$. В этом случае без учета емкости C_1 выражение (19-5-6) принимает вид:

$$C_{\text{п}} = C_{0\text{п}}\left[1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1)\frac{h}{H}\right]. \tag{19-5-7}$$

Обеспечить в рабочих условиях эксплуатации постоянство значения относительной диэлектрической проницаемости жидкости $\varepsilon_{\text{ж}}$, уровень которой измеряется, практически невозможно. Если обозначить диэлектрическую проницаемость жидкости в условиях эксплуатации через $\varepsilon'_{\text{ж}}$, то уравнение (19-5-7), в котором $\varepsilon_{\text{ж}}$ соответствует градуировочному значению, принимает вид:

$$C'_{\text{п}} = C_{0\text{п}}\left[1 + (\varepsilon'_{\text{ж}} - 1)\frac{h}{H}\right]. \tag{19-5-8}$$

Вычитая это уравнение из выражения (19-5-7), имеем:

$$\Delta C_{\text{п}} = C_{\text{п}} - C'_{\text{п}} = C_{0\text{п}}\,\Delta\varepsilon_{\text{ж}}\frac{h}{H}, \tag{19-5-9}$$

где $\Delta\varepsilon_{\text{ж}} = \varepsilon_{\text{ж}} - \varepsilon'_{\text{ж}}$.

Таким образом, в рабочих условиях эксплуатации отклонение $\varepsilon_{\text{ж}}$ от градуировочного значения приводит к изменению емкости преобразователя, а следовательно, и показаний уровнемера. Как видно из (19-5-9), с ростом значения h увеличивается и $\Delta C_{\text{п}}$ и в большей степени изменяется погрешность измерения.

Рассмотрим влияние активного сопротивления утечек преобразователя на точность измерения уровня. Полное сопротивление преобразователя Z по отношению к зажимам a состоит из емкостного сопротивления $1/\omega C_{\text{п}a}$ и параллельного ему активного сопротивления $R_{\text{п}a}$. В этом случае полная проводимость цепи преобразователя определяется выражением

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R_{\text{п}a}} + \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega C_{\text{п}a}}\right)^2}, \tag{19-5-10}$$

где $C_{\text{п}a}$ — емкость преобразователя (19-5-3); $\omega = 2\pi f$, здесь f — частота в Гц;

$$\frac{1}{R_{\text{п}a}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{\text{п}}}. \tag{19-5-11}$$

В формуле (19-5-11) R_1 — активное сопротивление утечки, которое не изменяется при изменении уровня жидкости. Значение этого сопротивления зависит от качества изоляционных материалов, используемых в конструкции преобразователя, от сопротивления утечки соединительного кабеля, а также проводящих пленок, которые могут образовываться на поверхности изоляторов.

Активное сопротивление утечки преобразователя $R_{\text{п}}$ определяется в основном высотою уровня жидкости в нем, т. е. значе-

нием h/H. Если учесть, что удельное электрическое сопротивление неэлектропроводных жидкостей достаточно большое, то вследствие этого значение проводимости утечки $1/R_п$ будет весьма мало.

Из рассмотренных слагаемых в (19-5-11) наибольшее влияние на точность измерения уровня будет оказывать сопротивление утечки R_1. Соотношение между емкостным сопротивлением $1/\omega C_{па}$ и параллельным ему активным сопротивлением $R_{па}$ зависит также от рабочей частоты тока, на которой производят измерение уровня жидкости.

Наличие сопротивления утечек в выходном параметре преобразователя приводит к появлению в измерительной схеме уровнемера сигнала помехи, фаза которого сдвинута относительно фазы основного сигнала на 90°. Это в свою очередь приводит к изменению показаний уровнемера. Для уменьшения этого влияния, как будет показано ниже, в тракт усиления прибора вводят фазовый детектор, который отфильтровывает сигнал помехи.

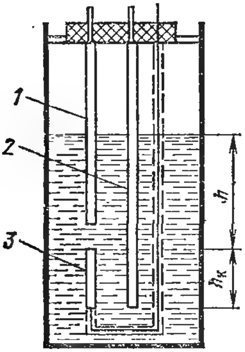


Рис. 19-5-2. Схема емкостного преобразователя с компенсационным конденсатором.

Для повышения точности измерения уровня за счет уменьшения влияния изменения относительной диэлектрической проницаемости жидкости $\varepsilon_ж$ на показания уровнемера преобразователь снабжают компенсационным конденсатором. Это позволяет автоматически вводить поправку в показания уровнемера при отклонении $\varepsilon_ж$ от значения принятого при градуировке прибора. Схема преобразователя ПЕ-6 с компенсационным конденсатором, применяемого в уровнемере ДУЕ-2, приведена на рис. 19-5-2. Здесь *1* и *2* — электроды измерительного конденсатора, а *3* и *2* (нижняя часть) — электроды компенсационного конденсатора. Емкость компенсационного конденсатора $C_к = C_{0к}\varepsilon_ж$ ($C_{0к}$ — начальная емкость компенсационного конденсатора при $\varepsilon_в = 1$) меняется с изменением $\varepsilon_ж$. Компенсационный конденсатор всегда остается полностью погруженным в жидкость, уровень которой измеряется. Это обусловливает наличие неизмеряемого уровня жидкости в резервуарах, зависящего от высоты компенсационного конденсатора $h_к$, которая для преобразователя ПЕ-6 уровнемера ДУЕ-2 равна 200 мм.

Конструктивно преобразователь ПЕ-6 выполнен из двух жестко соединенных конденсаторов: образованного двумя коаксиально расположенными трубами, и компенсационного, состоящего из нескольких коаксиально расположенных коротких труб.

Первичные преобразователи для измерения уровня электропроводных жидкостей. В преобразователях этого типа один электрод конденсатора выполняют изолированным в виде стержня, провода или кабеля. Вторым электродом служат стенки металлического резервуара, в котором измеряют уровень жидкости. Если резервуар

имеет большие размеры или стенки резервуара выполнены из непроводящего материала, то необходимо для обеспечения надежности измерения параллельно оси изолированного электрода устанавливать в резервуаре металлические электроды (например, стержни, трубы, полосы) на определенном расстоянии, рекомендуемом заводом-изготовителем. Стабильность характеристик прибора и точность измерения уровня будут обеспечиваться в большей степени, когда у преобразователя изолированный электрод расположен в стальной трубе. Примером этого может служить уровнемер ДУЕ-2, работающий с преобразователем ПЕИ-1, у которого изолированный электрод, выполненный в виде U-образного провода, установлен в стальной трубе.

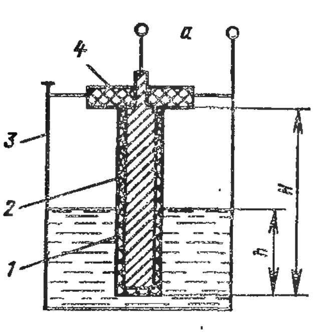


Рис. 19-5-3. Схема устройства емкостного преобразователя для измерения уровня электропроводных жидкостей.

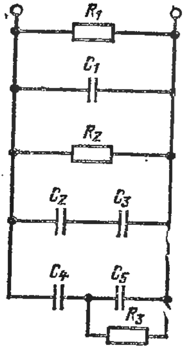


Рис. 19-5-4. Эквивалентная электрическая схема преобразователя (рис. 19-5-3).

На рис. 19-5-3 представлена схема устройства емкостного преобразователя для измерения уровня электропроводной жидкости. Один электрод преобразователя выполнен в виде металлического стержня *1*, наружная поверхность которого покрыта изоляцией *2*, например фторопластом. Вторым электродом служит цилиндрическая стенка резервуара *3*, в котором измеряют уровень жидкости. Рассмотренная схема преобразователя используется в емкостном индикаторе уровня типа ЭИУ-2. На рис. 19-5-4 изображена эквивалентная электрическая схема этого преобразователя. Здесь C_1 — емкость проходного изолятора *4* и соединительного кабеля, значение которой не зависит от среды, находящейся в резервуаре; C_2 — емкость, образованная наличием на электроде *1* изоляционного покрытия *2* с диэлектрической проницаемостью ε_2 на участке длиною $H - h$; C_3 — емкость между наружной поверхностью изолированного электрода *1* и стенкой резервуара *3* на участке высотою $H - h$, где диэлектриком являются воздух и пары жидкости, уровень которой измеряют; C_4 — емкость, образованная наличием на электроде *1* изоляционного покрытия с диэлектрической про-

ницаемостью ε_2 на участке высотою h, соприкасающемся с проводящей жидкостью; C_5 — емкость между наружной поверхностью изолированного электрода *1* и стенкой резервуара *3* на участке высотою h, где диэлектриком служит жидкость с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_ж$; R_1 — активное сопротивление утечек, значение которого зависит от качества изоляционного материала, применяемого в конструкции преобразователя, от сопротивления утечки соединительного кабеля и проводящих пленок, которые могут образовываться на поверхности изолятора; R_2 — активное сопротивление утечки на участке $H - h$, зависящее от удельного электрического сопротивления воздуха, паров жидкости и изоляционного материала на стержне (проводимостью утечки на этом участке можно пренебречь); R_3 — активное сопротивление утечки на участке высотою h, значение которого зависит от удельного электрического сопротивления жидкости $\rho_ж$.

Емкости C_2 и C_3, включенные последовательно, малы по сравнению с емкостью на участке h, и ими можно пренебречь. При повышении уровня общая емкость C_4 и C_5 возрастает, так как поверхность соприкосновения с электродами *1* и *3* проводящей жидкости увеличивается, кроме того, в этом случае мы имеем как бы уменьшение расстояния между электродами *1* и *3*. Таким образом, емкость преобразователя, отнесенная к зажимам *a*, пропорциональна измеряемому уровню жидкости и определяется выражением

$$C_{па} = C_1 + \frac{C_4 C_5}{C_4 + C_5}. \qquad (19\text{-}5\text{-}12)$$

Наличие сопротивлений утечек R_1 и R_3 в выходном параметре преобразователя приводит к появлению дополнительного сигнала, фаза которого будет сдвинута относительно основного сигнала так же, как в уровнемере для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей.

Устройство емкостных уровнемеров. В емкостных уровнемерах для измерения электрической емкости преобразователя, пропорциональной контролируемому уровню жидкости, используют резонансные и мостовые схемы.

Резонансные схемы применяют в емкостных (электронных) сигнализаторах уровня ЭСУ-1, ЭСУ-2 и др. [75, 86]. Эти сигнализаторы уровня применяют для контроля уровня жидкостей, а также и различных сыпучих тел с постоянной влажностью.

Мостовые измерительные схемы используют в большинстве емкостных уровнемеров, снабжаемых вторичными показывающими или показывающими и самопишущими приборами. Вторичные приборы этих уровнемеров могут иметь контактное устройство для сигнализации предельных значений уровня.

Принципиальная схема электронного индикатора уровня ЭИУ-2, выпускаемого рязанским заводом «Теплоприбор», приведена на рис. 19-5-5. Измерительная схема представляет индуктивно-емкостный мост, состоящий из индуктивностей двух вторичных обмоток

трансформатора Tp, конденсаторов C_1, C_2 (перемычка в положении *1—2*) и емкости преобразователя $C_п$. В этом случае измеряемая емкость преобразователя должна находиться в диапазоне 0—300 пФ. Если в схему моста будут включены вместо C_2 конденсаторы C_3 и C_4 (перемычка в положении *1—3*, *1—4*) или C_3 и C_5 (перемычку устанавливают в положение *1—3*, *1—5*), то измеряемая емкость преобразователя $C_п$ должна находиться соответственно в диапазоне 0—600 или 0—1200 пФ.

Питание прибора осуществляется напряжением переменного тока 220 или 127 В, частотой 50 Гц. Измерительный мост питается от генератора синусоидальных колебаний частотой 100 кГц, собранного на транзисторе по схеме с LC-контуром. Сигнал разбаланса моста, пропорциональный контролируемому уровню жидкости, подается на вход усилителя, состоящего из эмиттерного повторителя, усилительного каскада и выходного каскада. Выходное напряжение, снимаемое с резистора выходного каскада, составляет 0—100 мВ. В качестве показывающего и самопишущего прибора может быть использован автоматический потенциометр КСП2 или показывающий миллиамперметр типа М325, включаемый в разрыв эмиттерной цепи транзистора выходного каскада.

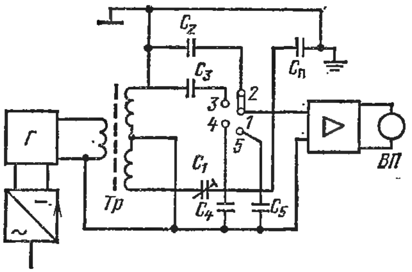


Рис. 19-5-5. Принципиальная электрическая схема уровнемера ЭИУ-2.

Электронный индикатор уровня ЭИУ-2 в комплекте с пластинчатым или тросовым емкостным преобразователем предназначен для контроля уровня неэлектропроводных жидкостей, находящихся под давлением до 25 кгс/см² (2,5 МПа) и имеющих температуру от —40 до 200°С. При применении этого уровнемера следует учитывать, что изменение значения диэлектрической проницаемости жидкости, уровень которой измеряется, приводит к изменению показаний прибора.

Индикатор уровня ЭИУ-2 в комплекте со стержневым емкостным преобразователем с фторопластовым покрытием предназначен для контроля уровня электропроводных жидкостей, находящихся под давлением до 25 кгс/см² (2,5 МПа) и имеющих температуру от —40 до 200°С. Уровнемер в комплекте с емкостным преобразователем кабельного типа с полиэтиленовым покрытием используется для контроля уровня электропроводных жидкостей, находящихся под давлением до 10 кгс/см² (1 МПа) и имеющих температуру от —40 до 80°С.

Указанные выше для уровнемера ЭИУ-2 диапазоны измерения емкости преобразователя $C_п$, пропорциональной измеряемому уровню жидкости, зависят от типа преобразователя, его длины, характеристики жидкости и способа установки преобразователя на резервуаре.

Пластинчатые и тросовые емкостные преобразователи изготовляются длиною соответственно от 1 до 2,5 м и от 4 до 20 м. Стержневые и кабельные емкостные преобразователи изготовляются длиною соответственно от 1 до 2,5 м и от 4 до 10 м.

Установка указателя показывающего прибора на начальную отметку шкалы производится подстроечным конденсатором C_1. Для установки указателя прибора на конечную отметку шкалы служит регулируемый резистор, включенный в эмиттерную цепь транзистора усилительного каскада (на рис. 19-5-5 не показан).

Предел допускаемой основной погрешности электронного индикатора уровня ЭИУ-2 равен 2,5% диапазона измерения. При применении ЭИУ-2 в качестве уровнемера необходимо производить его настройку (выбор диапазона измерений, установку указателя прибора на начальную и конечную отметки шкалы), что связано с необходимостью слива жидкости из резервуара и его последующим заполнением. Необходимость проведения в рабочих условиях экс-

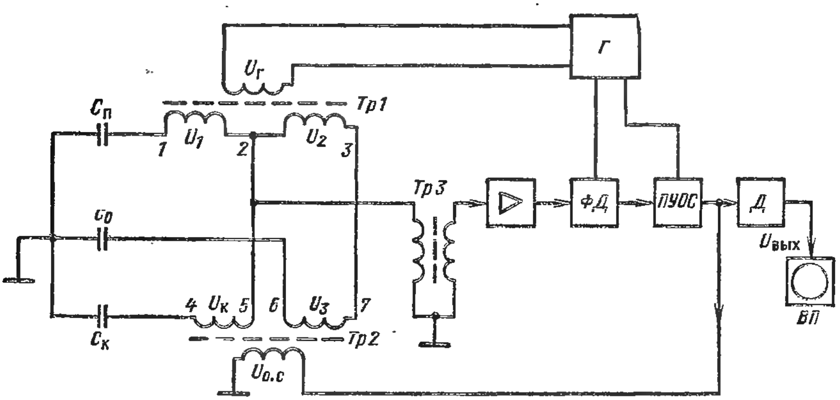


Рис. 19-5-6. Принципиальная электрическая схема уровнемера ДЕУ-2 с использованием емкостного преобразователя ПЕ-6.

плуатации такой настройки является существенным недостатком этого уровнемера. К недостаткам следует также отнести нелинейность статической характеристики уровнемера.

Индикатор уровня ЭИУ-2 в комплекте с пластинчатым или тросовым емкостным преобразователем может быть использован для измерения уровня сыпучих тел с постоянной влажностью и с размером гранул менее 5 мм.

Более совершенными являются емкостные уровнемеры типа ДЕУ-2, разработанные НИИТеплоприбором. Эти приборы, выпускаемые заводом «Теплоприбор» (г. Рязань), предназначены для дистанционного измерения уровня неэлектропроводных и электропроводных жидкостей в комплекте с емкостным преобразователем соответственно типов ПЕ-6 и ПЕИ-1.

Принципиальная электрическая схема уровнемера ДЕУ-2 с использованием емкостного преобразователя ПЕ-6 (рис. 19-5-2) приведена на рис. 19-5-6. Преобразование сигнала емкостного преобразователя в напряжение осуществляется мостовой измерительной схемой с обратной связью. Плечами моста служит емкость измери-

тельного конденсатора преобразователя $C_п$, емкость компенсационного конденсатора преобразователя $C_к$, вторичная обмотка *1—2* трансформатора *Тр1* и вторичная обмотка *4—5* трансформатора *Тр2*. Вторичная обмотка *2—3* трансформатора *Тр1*, конденсатор с постоянной емкостью C_0 и вторичная обмотка *6—7* трансформатора *Тр2* включены в измерительную диагональ моста.

В рассматриваемой схеме уровнемера приняты следующие обозначения: *Г* — генератор синусоидальных колебаний с усилителем мощности и элементом сравнения, питающий мостовую измерительную схему стабилизированным напряжением $U_г$ частотой 50 кГц; *Тр3* — входной трансформатор усилителя; *ФД* — фазовый детектор; ПУОС — преобразовательное устройство обратной связи; *Д* — детектор; *ВП* — вторичный прибор; $U_г = U_1 = -U_2$ — напряжение на обмотках *1—2* и *2—3* трансформатора *Тр1*; $U_3 = U_{0.c}\kappa_1$ — напряжение на обмотке *6—7* трансформатора *Тр2*; $U_{0.c}$ — выходное напряжение преобразовательного устройства обратной связи; κ_1 — коэффициент трансформации обмотки *6—7* трансформатора *Тр2*; $U_к = U_{0.c}\kappa_2$ — напряжение на обмотке *4—5* трансформатора *Тр2*; κ_2 — коэффициент трансформации обмотки *4—5* трансформатора *Тр2*.

Для мостовой измерительной схемы уровнемера принято $\kappa_2 C_{0.к} = \kappa_1 C_{0.п}$ и $C_0 = C_{0.п}$. Питание емкостного уровнемера производится от сети напряжением переменного тока 220 В, частотой 50 Гц.

Если уровень жидкости в резервуаре $h = 0$ (см. рис. 19-5-2), то напряжение в измерительной диагонали моста равно нулю. При повышении уровня жидкости до значения h мост разбалансируется и в измерительной диагонали его появится напряжение частотой 50 кГц. С выхода моста это напряжение, пропорциональное измеряемому уровню жидкости, подается через трансформатор *Тр3* на вход двухкаскадного усилителя, а затем усиленный сигнал поступает на вход фазового детектора. Сигнал постоянного тока с выхода фазового детектора поступает на вход преобразовательного устройства обратной связи, которое преобразовывает его в напряжение переменного тока частотой 50 кГц. С выхода преобразовательного устройства напряжение подается на первичную обмотку трансформатора *Тр2*, вторичные обмотки которого включены в измерительную схему моста, и на вход детектора. Выходным сигналом детектора является напряжение постоянного тока 0—10 В. В качестве вторичного прибора служит вольтметр КСУ2, выполненный на базе автоматического потенциометра КСП2 (гл. 4).

Напряжение U_3 во вторичной обмотке трансформатора *Тр2* уменьшает выходное напряжение моста до некоторого минимального значения, определяемого коэффициентом усиления передаточного тракта прибора. Наличие в одном из плеч моста компенсационного конденсатора $C_к$ преобразователя, преобразовательного устройства обратной связи с выходным сигналом частотой 50 кГц и вторичной обмотки *4—5* у трансформатора *Тр2*, являющейся плечом моста, позволяет осуществить автоматическое введение

поправки на изменение диэлектрической проницаемости жидкости, уровень которой измеряется.

Опорное напряжение, подаваемое на фазовый детектор от генератора, совпадает с основным сигналом, пропорциональным измеряемому уровню жидкости. Сигнал помехи, обусловленный наличием сопротивления утечки в выходном параметре емкостного преобразователя, сдвинут по фазе на 90° по отношению к опорному напряжению. Это позволяет с помощью фазового детектора отфильтровывать помеху. Наличие в схеме прибора фазового детектора позволяет также получить устойчивую систему при достаточно большом коэффициенте усиления κ усилительного тракта прибора.

Для рассматриваемой измерительной схемы напряжение частотой 50 кГц, снимаемое с диагонали моста, равно:

$$\frac{U_{\text{о. с}}}{\kappa}=\frac{U_1C_{\text{п}}-U_2C_0+U_3C_0-U_{\text{к}}C_{\text{к}}}{C_{\text{п}}+C_0+C_{\text{к}}}=$$
$$=\frac{U_{\text{г}}C_{\text{п}}-U_{\text{г}}C_0+\kappa_1U_{\text{о. с}}C_0-\kappa_2U_{\text{о. с}}C_{\text{к}}}{C_{\text{п}}+C_0+C_{\text{к}}}.$$

С учетом приведенных в описании схемы равенств это выражение принимает вид:

$$U_{\text{о. с}}\left[\frac{C_{\text{п}}+C_{0\text{п}}+C_{\text{к}}}{\kappa}+\kappa_1C_{0\text{п}}(\varepsilon_{\text{ж}}-1)\right]=U_{\text{г}}(C_{\text{п}}-C_{0\text{п}}).$$

Учитывая выражение (19-5-7), находим:

$$U_{\text{о. с}}=U_{\text{г}}\frac{h}{H}\frac{C_{0\text{п}}(\varepsilon_{\text{ж}}-1)}{\dfrac{C_{\text{п}}+C_{0\text{п}}+C_{\text{к}}}{\kappa}+\kappa_1C_{0\text{п}}(\varepsilon_{\text{ж}}-1)}. \qquad (19\text{-}5\text{-}13)$$

При большом коэффициенте усиления прямого канала прибора ($\kappa\to\infty$) выражение (19-5-13) принимает вид:

$$U_{\text{о. с}}=U_{\text{г}}\frac{1}{\kappa_1}\frac{h}{H}. \qquad (19\text{-}5\text{-}14)$$

Из этого уравнения видно, что выходное напряжение преобразовательного устройства обратной связи $U_{\text{о. с}}$, а следовательно, и выходное напряжение прибора $U_{\text{вых}}$ не зависят от изменения электрических свойств жидкости, уровень которой измеряется. Следует также отметить, что $U_{\text{о. с}}$ и измеряемое значение h/H связаны пропорциональной зависимостью.

Рассмотренная схема уровнемера ДУЕ-2 с емкостным преобразователем ПЕ-6 используется также для измерения уровня электропроводной жидкости в комплекте с емкостным измерительным преобразователем ПЕИ-1.

Предел допускаемой основной погрешности емкостного уровнемера ДУЕ-2 не превышает 2,5% диапазона измерения. Диапазон измерения зависит от выбранной длины электродов емкостных преобразователей. Приборы ДУЕ-2 могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под давлением до 60 кгс/см² (6 МПа) и имеющих температуру от 0 до 200°С.

19-6. Акустические и ультразвуковые уровнемеры

Общие сведения. В акустических и ультразвуковых уровнемерах реализуется метод, основанный на использовании эффекта отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями.

В уровнемерах, называемых акустическими, используется метод локаций уровня жидкости через газовую среду. Достоинством этого метода является то, что акустическая энергия, посланная в объект для измерения уровня жидкости, распространяется по газовой среде. Это обеспечивает универсальность по отношению к различным жидкостям, уровень которых необходимо измерить, а также высокую надежность первичных преобразователей, не контактирующих с жидкостью.

В уровнемерах, называемых ультразвуковыми, используется метод, основанный на отражении ультразвуковых колебаний от границы раздела сред со стороны жидкости.

В зависимости от используемого параметра звуковой волны для измерения уровня жидкости различают частотный, фазовый и импульсный способы измерения уровня, а также некоторые их комбинации, такие, как импульсно-частотный, и др. Каждый из указанных способов, обладая общим для акустического (ультразвукового) метода измерения достоинствами, имеет свои преимущества и недостатки.

Акустические уровнемеры широко применяют для дистанционного измерения уровня жидкостей в различных объектах в химической, бумажной, пищевой и других отраслях промышленности. Уровнемеры этого типа могут быть использованы для измерения уровня различных жидкостей (однородных и неоднородных, вязких, агрессивных, кристаллизующихся, выпадающих в осадок), находящихся под давлением до 40 кгс/см^2 (4 МПа) и имеющих температуру от 5 до 80° С. Акустические уровнемеры не могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под высоким избыточным и вакуумметрическим давлением. Если жидкость, уровень которой необходимо измерять, будет находиться под вакуумметрическим давлением до 0,5 кгс/см^2 (0,05 МПа), то акустические уровнемеры могут быть использованы.

Ультразвуковые уровнемеры могут быть использованы для измерения уровня только однородных жидкостей и широкого распространения в промышленности не получили. Однако ультразвуковые уровнемеры позволяют измерять уровень однородных жидкостей, находящихся под высоким избыточным давлением.

Акустический уровнемер ЭХО-1. Уровнемер ЭХО-1, разработанный НИИтеплоприбором, предназначен для измерения уровня различных жидкостей на основе метода акустической импульсной лакации границы раздела сред со стороны газа [83]. Мерой уровня жидкости является время распространения ультразвуковых колебаний t от источника излучения (акустического преобразова-

теля) до плоскости границы раздела сред и обратно до приемника.

Схема акустического уровнемера ЭХО-1 представлена на рис. 19-6-1. В соответствии с принятыми на этой схеме обозначениями время распространения ультразвуковых колебаний t определяется выражением

$$t=\frac{2(H-h)}{a}=\frac{2H}{a}-\frac{2h}{a},$$

где $H-h$ — высота газового столба; H — расстояние от источника излучения до нулевого уровня; h — высота уровня жидкости; a — скорость распространения звука в газовой среде.

В акустическом уровнемере ЭХО-1 генератор *9* вырабатывает электрические импульсы с определенной частотой повторения, пре-

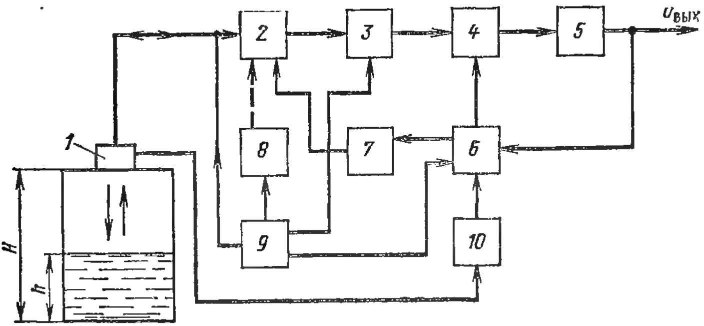


Рис. 19-6-1. Схема акустического уровнемера ЭХО-1.

образуемые в ультразвуковые при помощи акустического преобразователя *1*, установленного на крышке резервуара. Распространяясь вдоль акустического тракта, ультразвуковые импульсы отражаются от плоскости границы раздела сред и попадают на тот же преобразователь *1*. Отраженные ультразвуковые импульсы после обратного преобразования в электрические усиливаются, формируются усилителем-формирователем *2* и подаются на устройство измерения времени запаздывания отраженного сигнала — триггер *3*.

Формирование унифицированного выходного сигнала постоянного тока 0—5 мА осуществляется при помощи компенсационного преобразователя, основанного на принципе статического регулятора, в состав которого входит устройство сравнения *4*, усилительно-преобразующее устройство и элемент обратной связи — блок преобразования напряжения во временной интервал *6*.

Формирование выходного сигнала осуществляется путем автоматического слежения блоком *6* за длительностью импульсов с триггера. Прямоугольные импульсы с триггера и из цепи обратной связи компенсационного преобразователя (блока *6*) подаются на

устройство сравнения *4*. Если длительность импульса с триггера больше (или меньше) импульса из цепи обратной связи, то на выходе блока *4* появляется сигнал небаланса, который при помощи усилительно-преобразующего устройства *5* повышает (или уменьшает) значение выходного сигнала. Это происходит до тех пор, пока сигнал небаланса не уменьшится до нуля. Слежение происходит именно за длительностью импульсов, поэтому амплитуда и частота повторения их не влияют на значение выходного сигнала. На показаниях уровнемера не сказывается также изменение в широком диапазоне нагрузки преобразователя.

Для уменьшения влияния изменения температуры газа на показания прибора (скорость распространения звука в газовой среде зависит от температуры) уровнемер содержит блок температурной компенсации *10*, который включает в себя термометр сопротивления, расположенный внутри акустического преобразователя.

В схеме уровнемера предусмотрено помехозащитное устройство *7*, исключающее влияние на показания прибора различного рода помех на входе усилителя *2*.

Для проверки работоспособности электрической схемы уровнемера используется блок контроля *8*. Основные функциональные узлы электрической схемы прибора выполнены на основе унифицированных интегральных схем.

Акустический уровнемер ЭХО-1, изготовляемый серийно заводом «Теплоприбор» (Рязань), выпускается на диапазоны измерения 0—1, 0—2, 0—3 м. Класс точности уровнемера — 2,5.

Ультразвуковой уровнемер. В рассматриваемом ультразвуковом уровнемере используется импульсный способ измерения уровня по отражению ультразвуковых колебаний от границы раздела сред со стороны жидкости. Мерой уровня жидкости h в этом случае является также время прохождения ультразвуковых колебаний t от пьезометрического преобразователя (излучателя) до плоскости границы раздела сред (жидкость — газ) и обратно до приемника. Время прохождения ультразвуковых колебаний t определяется выражением

$$t = \frac{2h}{a},$$

где a — скорость распространения звука в жидкости.

Пауза $t_п$ между двумя последовательными посылаемыми импульсами определяется выражением

$$t_п \geqslant 10t = \frac{20h}{a}.$$

Схема ультразвукового уровнемера приведена на рис. 19-6-2. Уровнемер состоит из пьезометрического преобразователя *1*, электронного блока *7* и вторичного прибора *5*. Электронный блок включает в себя генератор *6*, задающий частоту повторения импульсов; генератор импульсов *2*, посылаемых в жидкость, уровень которой измеряется; приемного устройства — усилителя *3*; схемы измере-

ния времени 4. Генератор, задающий частоту повторения импульсов, управляет работой генератора импульсов и схемой измерения времени. Генератор 2 вырабатывает электрические импульсы с определенной частотой повторения, которые преобразуются в ультразвуковые при помощи пьезометрического преобразователя, установленного с внешней стороны дна резервуара. Распространяясь в жидкой среде, ультразвуковые импульсы отражаются от плоскости границы раздела жидкость — газ и поступают на тот же пьезометрический преобразователь. Отраженные импульсы после обратного преобразования в электрические усиливаются и формируются усилителем 3 и подаются на схему измерения времени. Выходным сигналом измерительной схемы являются постоянное напряжение, которое поступает на вход вторичного прибора 5. В качестве вторичного прибора может быть использован автоматический потенциометр.

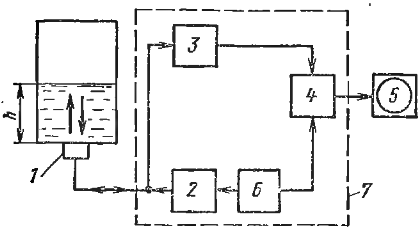


Рис. 19-6-2. Схема ультразвукового уровнемера.

Предел допускаемой основной погрешности ультразвукового уровнемера не превышает 2,5% диапазона измерения уровня жидкости.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ СЫПУЧИХ ТЕЛ

20-1. Общие сведения

Измерение уровня сыпучих тел в бункерах и других устройствах значительно отличается от измерения уровня жидкостей, так как характер расположения материала в объекте не позволяет говорить о его уровне как о горизонтальной поверхности. Большое разнообразие материалов, уровень которых необходимо измерять в энергетике и промышленности, требует применения различных методов и конструкций уровнемеров.

На ТЭС уровнемеры необходимы для измерения уровня кускового (сырого) угля и угольной пыли в бункерах. В промышленности уровнемеры применяют для измерения уровня шихты, угля, породы, различных порошкообразных материалов. При измерении уровня сыпучих тел, в частности твердого топлива, необходимо знать характер движения материала в объекте (бункере) и форму объекта. Выбирая технические средства для автоматического контроля уровня, необходимо учитывать возможную взрывоопасность материала, уровень которого подлежит измерению.

Бункера для кускового и пылевидного топлива на ТЭС в большинстве случаев имеют форму усеченной пирамиды с направленной

вниз вершиной. Они выполняются из армированного бетона или стали. Такая форма бункера оказывает определенное влияние на характер движения топлива. При высоте бункера 8—10 м слой топлива в нем подвергается достаточно большому горизонтальному сжатию, что вызывает заметное ухудшение его сыпучих свойств. В связи с этим в бункере любой емкости в зоне максимальных давлений возможно появление зависаний и сводообразования. Из-за возможности этих явлений на внутренней поверхности бункера (особенно в зоне максимальных давлений) не должно быть никаких выступов, которые могут искажать характер движения топлива.

Обычно в бункере топливо частично располагается на внутренних стенках в виде слоев различной толщины. По мере срабатывания центральных слоев топлива уменьшается и толщина слоя на стенках бункера. Вследствие этого реальная емкость бункера сокращается на 20—25% по сравнению с номинальной. Размер слоя топлива на стенках зависит от угла наклона стенок бункера, влажности топлива и коэффициента внутреннего трения. Для устранения зависаний топлива в бункере применяют различные обрушивающие устройства.

В бункерах с кусковым топливом за уровень условно принимается низшая точка воронки со стороны крышки бункера. Угольная пыль вследствие высокой текучести располагается в виде более или менее ровного горизонтального слоя, однако при потере угольной пылью текучих свойств и ее слеживании понижение уровня происходит с перекосами, сопровождается образованием воронок, «колодцев» и налипанием слоя пыли на стенках бункера.

Для автоматизации загрузки бункеров или других объектов необходимо как минимум обеспечить с помощью сигнализирующих уровнемеров автоматический контроль наличия материала в двух сечениях по высоте в нижней части каждого бункера — для получения сигнала на включение загрузочных устройств и в верхней части — для получения сигнала на отключение загрузочных устройств.

Для обеспечения большей надежности ведения технологического процесса нередко возникает необходимость в непрерывном контроле уровня в бункерах или в других объектах. В этом случае для дистанционного измерения уровня сыпучих тел в технологических объектах применяют уровнемеры, снабженные вторичными приборами, которые должны иметь контактное устройство для сигнализации предельных значений уровня. Контактное устройство вторичных приборов можно использовать также и для автоматизации загрузки бункеров или других объектов.

Технические средства, предназначенные для измерения и сигнализации уровня сыпучих тел, подразделяют на электромеханические, электрические, электронные, пневматические, радиоактивные и весовые [75, 84, 85]. В настоящее время номенклатура серийно изготовляемых для применения на ТЭС сигнализаторов и измери-

телей уровня ограничена, некоторые типы из них внедрены в опытном порядке, но серийно их не выпускают. Уровнемеры радиоактивные, пневматические и весовые на ТЭС распространения не получили.

20-2. Сигнализаторы уровня сыпучих тел

Для сигнализации предельных уровней сыпучих тел и автоматизации загрузки бункеров и других емкостей применяют различные типы сигнализирующих устройств.

В химической промышленности находят применение сигнализаторы уровня с чувствительными преобразовательными элементами, воспринимающими давление сыпучих тел, уровень которых контролируется [86]. К этой группе электромеханических устройств относятся сигнализаторы уровня мембранные и маятниковые. В пищевой промышленности применяются мембранные сигнализаторы уровня, выпускаемые серийно [75] и используемые в системах управления подачей муки, зерна и других сыпучих материалов с целью предупреждения аварийного накопления материала в подводящих и отводящих самотеках зерноперерабатывающих машин.

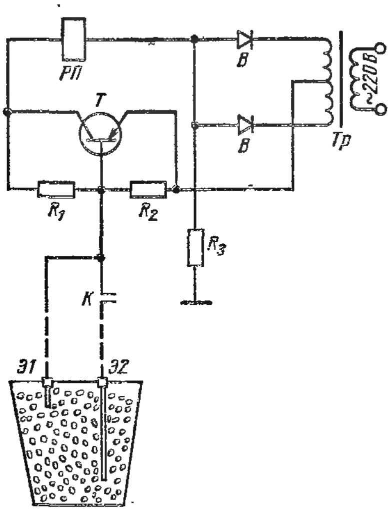


Рис. 20-2-1. Схема сигнализатора уровня угольной пыли в бункере.

Опыт эксплуатации на ТЭС мембранных сигнализаторов уровня угольной пыли в бункерах показал, что они не обеспечивают надежный контроль уровня вследствие образования на стенках слоев пыли. По этой же причине нельзя рекомендовать для контроля уровня угольной пыли сигнализаторы маятникового типа.

На рис. 20-2-1 приведена принципиальная схема электронного сигнализатора уровня угля в бункерах, разработанного Уральским отделением ОРГРЭС [85]. На этой схеме приняты следующие обозначения: *Т* — триод полупроводниковый; *РП* — обмотка электромагнитного реле, включенная в цепь коллектора; *В* — выпрямитель, питающий схему постоянным напряжением 24 В; *Э1* и *Э2* — электроды соответственно верхнего и нижнего уровня; *К* — контакты реле *РП*. Контакты цепей сигнализации и управления на схеме не показаны.

Резисторы R_1 и R_2 образуют делитель напряжения, подающий на базу триода постоянный потенциал, для стабилизации во времени нулевого тока коллектора. Резистор R_3 устанавливается при

малом переходном сопротивлении топлива для ограничения управляющего тока базы.

При загрузке бункера топливом до верхнего уровня электрод *Э1* замыкается через слой топлива на «землю», триод отпирается и через обмотку реле *РП* потечет ток. Реле срабатывает и включает сигнал о заполнении бункера углем до верхнего уровня. Одновременно при этом реле замыкает контакт *К* в цепи электрода *Э2* нижнего уровня. При снижении уровня топлива ниже конца электрода *Э2* реле отключается и подает сигнал об опорожнении бункера.

Для надежной работы этого сигнализатора уровня переходное сопротивление топлива между электродом и бункером не должно превышать 50 кОм. В реальных условиях сопротивление слоя угля в зависимости от заполнения бункера меняется в широких пределах. Например, при соприкосновении слоя топлива с электродом переходное сопротивление может составлять 100—140 кОм. При дальнейшем увеличении заполнения бункера углем указанное сопротивление уменьшается до 0,5 кОм. В соответствии с этим производится выбор длины электродов и определяется необходимая глубина погружения их в слой топлива. Рассмотренный сигнализатор уровня сыпучих тел (угля) серийно не выпускается.

Для сигнализации и автоматизации заполнения бункеров и других емкостей различными сыпучими материалами могут применяться емкостные сигнализаторы уровня с резонансной схемой типа ЭСУ-1, ЭСУ-2 и др. (гл. 19).

В угольной промышленности широко применяют сигнализаторы (реле) уровня типа ИКС (искробезопасный контроль сопротивлений), выпускаемые серийно заводом шахтной автоматики (г. Днепропетровск). Сигнализатор предназначен для контроля и автоматизации заполнения бункеров, течек и других емкостей сыпучими материалами (углем, породой и др.). Эти сигнализаторы уровня используются также на ТЭС для контроля и автоматизации загрузки бункеров кусковым углем. Сигнализатор может контролировать верхний уровень сыпучего материала в бункере (применяется один электрод) или верхний и нижний уровень (применяются два электрода).

Принципиальная электрическая схема сигнализатора уровня ИКС-2Н приведена на рис. 20-2-2. Здесь *Э1* и *Э2* — электроды соответственно верхнего и нижнего уровня; *ОК* — охранное кольцо; B_1 и B_2 — выпрямители; $П_1$ и $П_2$ — переключатели; *Тр* — трансформатор; *РП* — поляризованное реле РП-5; $ШС_1$ — катодный селеновый шунт; *С* — конденсатор; $К_1$ — контакты реле *РП*; $ШС_2$ — селеновые выпрямители, включенные навстречу друг другу, для искрогашения; *МКУ* — исполнительное реле МКУ-48; $К_2$ — контакты, замыкающие цепи электрода *Э2*; $К_3$ — контакты к цепям управления и сигнализации.

Катодный селеновый шунт $ШС_1$ по существу является разновидностью туннельного диода. Если на такой диод подать напряжение

больше максимального, то он закроется и через него будет проходить только ток утечки. Таким образом, когда цепь «электрод — земля» разомкнута (электрод *Э1* не касается материала) и напряжение мало, диод (шунт $ШС_1$) открыт и обмотки поляризованного реле *РП* замкнуты накоротко. При замыкании цепи электрода *Э1* через слой материала в бункере на «землю» и появлении напряжения больше максимального диод (шунт $ШС_1$) закростся и обмотки поляризованного реле окажутся включенными в цепь. Значение

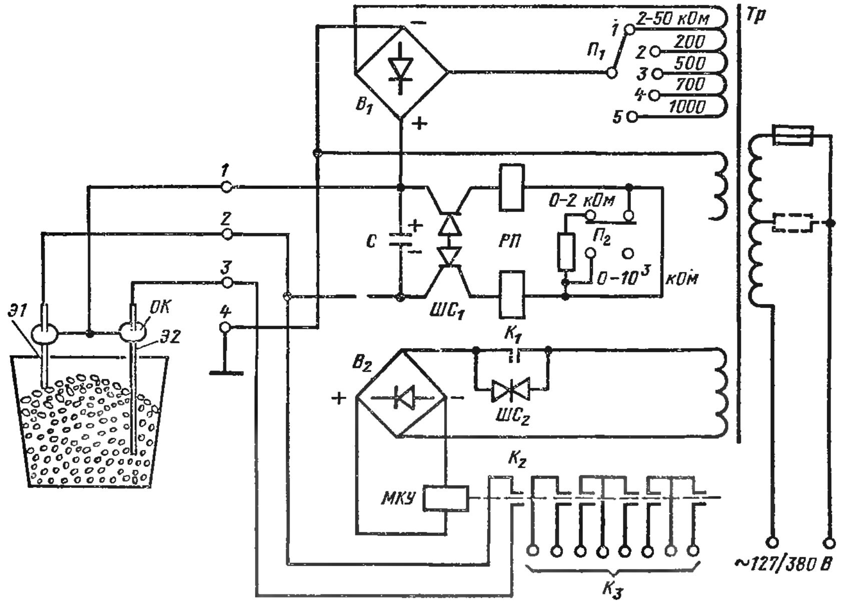


Рис. 20-2-2. Принципиальная электрическая схема сигнализатора уровня ИКС-2Н.

напряжения, которое закрывает диод (шунт $ШС_1$), постоянно и устанавливается в зависимости от переходного сопротивления сыпучего материала, находящегося между электродом и заземленной частью бункера, переключателями $П_1$ и $П_2$. Переключатель $П_1$ позволяет изменять постоянное напряжение питания схемы. Его положение, так же как и переключателя $П_2$, выбирают в зависимости от переходного сопротивления материала, уровень которого необходимо контролировать. Значения переходных сопротивлений, при которых можно применять сигнализатор, указаны на схеме для каждого переключателя.

При включении обмоток поляризованного реле в цепь оно срабатывает и замыкает контактами $К_1$ цепь переменного тока для питания выпрямителя $В_2$, который питает постоянным напряжением обмотку исполнительного реле *МКУ*. Это реле

срабатывает и замыкает свои контакты, а нормально замкнутые размыкает.

В случае использования двух электродов *Э1* и *Э2* при заполнении бункера материалом и повышения его уровня до электрода *Э2* сигнал в схему не поступает. Цепь электрода нижнего уровня *Э2* разомкнута контактами K_2 исполнительного реле. При дальнейшем заполнении, когда уровень материала в бункере дойдет до соприкосновения с электродом *Э1* и реле *РП* сработает, одновременно с контактами K_1 замкнется цепь электрода *Э2* и контактами K_2 цепь исполнительного реле. При этом выдаваемый сигнал соответствует верхнему уровню. При понижении уровня материала в бункере этот сигнал будет снят лишь тогда, когда уровень материала не будет касаться электрода *Э2*. Таким образом, если при понижении уровня слой материала не пройдет сечения нижнего уровня и начнется заполнение бункера, то бункер может быть переполнен, так как сигнал о достижении верхнего уровня не поступит. Отсюда следует, что сигнализатор дает представление только об одной «растянутой» позиции, не характеризующей положение уровня в ней. При применении сигнализатора уровня ИКС-2Н для контроля и автоматизации загрузки бункеров необходимо учитывать этот недостаток. Для предотвращения ложных срабатываний от утечек применено охранное кольцо *ОК*, на которое подается положительный потенциал по отношению к электроду.

Сигнализатор выпускают в модификациях ИКС-2Н и ИКС-2. Сигнализатор ИКС-2Н выполнен в нормальном общепромышленном исполнении, а ИКС-2 — во взрывобезопасном исполнении.

Следует отметить, что для обеспечения надежного контроля и автоматизации загрузки бункеров углем и пылью на ТЭС должны быть созданы более совершенные сигнализаторы уровня.

20-3. Приборы для измерения уровня сыпучих тел

Для непрерывного дистанционного измерения уровня сыпучих тел применяют уровнемеры, снабженные вторичными приборами. Из числа рассмотренных выше приборов (гл. 19) для дистанционного измерения уровня сыпучих тел с постоянной влажностью применяют электронные емкостные индикаторы уровня ЭИУ-2. Для измерения уровня сыпучих тел выпускают и другие типы емкостных уровнемеров [75]. Отметим, что емкостные приборы на ТЭС не обеспечивают необходимой надежности измерения уровня угля и пыли в бункерах и распространения не получили.

В некоторых отраслях промышленности, в частности химической, находят применение весовые измерители уровня или массы сыпучего материала в бункере [86]. В качестве преобразователя в этих уровнемерах используется мессдоза, которая является опорой одной из лап бункера. Мессдоза имеет стальной корпус с поршнем, герметизированным металлической мембраной. Мессдоза, соединительная линия и внутренняя полость трубчатой пружины

манометра заполнены жидкостью. Измеряемое давление в мессдозе манометром равно силе тяжести бункера с находящимся в нем материалом, деленной на площадь поршня.

В весовых уровнемерах кроме мессдозы применяют и более совершенные магнитоупругие преобразователи, которые обеспечивают более высокую точность измерения. Для преобразования силы тяжести бункера с заполняющим его материалом в электрический сигнал магнитоупругие преобразователи устанавливают под опорами его. Действие этих преобразователей основано на изменении магнитной проницаемости стальной пластины преобразователя при упругой механической деформации.

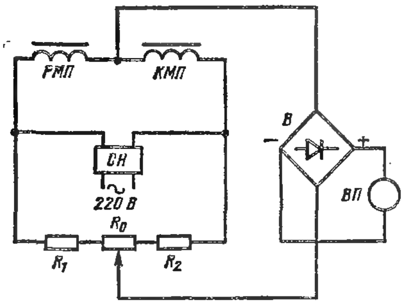


Рис. 20-3-1. Принципиальная схема весового уровнемера с магнитоупругими преобразователями.

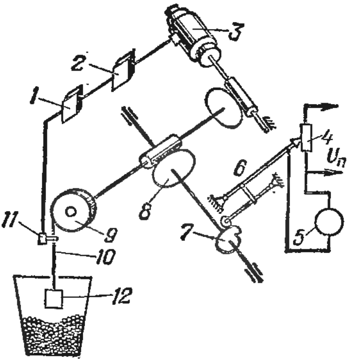


Рис. 20-3-2. Кинематическая схема электромеханического уровнемера.

Принципиальная электрическая схема весового уровнемера для измерения массы материала в бункере с использованием магнитоупругих преобразователей приведена на рис. 20-3-1. Здесь в качестве измерительной схемы используется неуравновешенный мост, где R_1 и R_2 — постоянные резисторы плеч моста; *РМП* — рабочий магнитоупругий преобразователь; *КМП* — компенсационный магнитоупругий преобразователь; R_0 — резистор для установки указателя вторичного прибора на начальную отметку; *В* — выпрямитель; *ВП* — вторичный прибор; *СН* — стабилизатор напряжения. В реальном весовом уровнемере в плече *РМП* моста находятся четыре последовательно соединенных магнитоупругих преобразователя. В качестве вторичного прибора могут быть использованы рассмотренные выше милливольтметры и автоматические потенциометры (гл. 4).

Для дистанционного измерения и сигнализации уровня сыпучих материалов в некоторых отраслях промышленности находят применение радиоактивные уровнемеры типа УР-8 и УДАР-5 [75, 77].

Вследствие отсутствия необходимых технических средств на ряде ТЭС для измерения уровня угольной пыли в бункерах используются несерийные электромеханические (лотовые) уровнемеры. Несмотря на недостатки этих уровнемеров

при дальнейшем их усовершенствовании и промышленном изготовлении они могут полностью обеспечить измерение уровня пыли в бункерах на ТЭС и автоматизацию их загрузки.

В качестве примера рассмотрим один из вариантов электромеханического (лотового) уровнемера, используемого на ТЭС [87]. Кинематическая схема этого уровнемера приведена на рис. 20-3-2. Здесь *1* — электронное реле; *2* — магнитный пускатель; *3* — электродвигатель колонки дистанционного управления (КДУ-1); *4* — реостатный преобразователь; *5* — вторичный прибор; *6* — рычажный механизм; *7* — кулачок; *8* — червячная пара; *9* — шкив из изоляционного материала, закрепленный на оси редуктора КДУ вместо штурвала для ручного управления; *10* — трос, намотанный на шкив, на свободном конце которого подвешен металлический груз; *11* — скользящий контакт; *12* — груз.

При включении уровнемера в работу электронное реле с помощью магнитного пускателя замыкает цепь питания электродвигателя. Вал электродвигателя, кинематически связанный со шкивом, вращает его в направлении, при котором груз опускается. Как только груз придет в соприкосновение с угольной пылью, в электронном реле происходит переключение цепей, управляющих магнитным пускателем. Вследствие этого электронное реле разрывает цепь питания первой обмотки магнитного пускателя, а следовательно, и цепь питания электродвигателя. Затем электронное реле замыкает цепь питания второй обмотки магнитного пускателя, который включает в работу электродвигатель. Вал электродвигателя приводит в действие шкив, который, вращаясь в обратном направлении, поднимает груз. Опускание и подъем груза осуществляются через каждый 6 мин. Таким образом, этот уровнемер является периодически действующим с определенным интервалом времени.

Перемещение груза, пропорциональное уровню пыли в бункере, преобразовывается посредством червячной пары, кулачка, рычажного механизма и реостатного преобразователя в напряжение, которое измеряет вторичный прибор. Шкала вторичного прибора может быть отградуирована в единицах, удобных для контроля уровня угольной пыли в бункере.

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВА ГАЗОВ

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВА ГАЗОВ

21-1. Общие сведения

Средства измерений, предназначенные для количественного определения состава газа, называются газоанализаторами и газовыми хроматографами. Эти технические средства в зависимости от их назначения подразделяются на переносные и автоматические.

Переносные газоанализаторы и хроматографы применяются в лабораторных условиях для количественного определения состава газа при выполнении исследовательских работ, а также при специальных обследованиях, испытаниях и наладке различных промышленных теплотехнических установок (парогенераторов, печей и др.). Приборы этого типа широко используются для проверки автоматических газоанализаторов.

Автоматические газоанализаторы, предназначенные для непрерывного автоматического измерения объемного процентного содержания одного определяемого компонента в газовой смеси, широко применяют в различных отраслях промышленности, в частности энергетической. Современные автоматические газоанализаторы позволяют определять содержание в газовой смеси двуокиси углерода (CO_2), кислорода (O_2), окиси углерода и водорода ($CO + H_2$), CO, H_2, метана (CH_4) и других газов.

Автоматические газоанализаторы широко применяют для контроля процесса горения в топочных устройствах парогенераторов, печей и других агрегатов, для анализа технологических газовых смесей, для определения содержания водорода в системах водородного охлаждения обмоток турбогенераторов и т. д.

Для правильного ведения топочного режима необходимо поддерживать определенное соотношение между количествами подаваемых в топку парогенератора (или печи) топлива и воздуха. Недостаточное количество воздуха приводит к неполному сгоранию топлива и уносу несгоревших продуктов в трубу. Избыточное количество воздуха обеспечивает полное сгорание, но требует больших затрат топлива на нагрев дополнительного объема воздуха. В том и другом случае полезная тепловая отдача топки парогенератора уменьшается. Необходимое соотношение топливо — воздух зависит от различных факторов и в первую очередь от вида топлива. Для различных видов топлива устанавливают оптимальное значение коэффициента избытка воздуха α, при котором обеспечивается экономичная работа установки.

Непрерывный контроль топочного режима в эксплуатационных условиях на современных ТЭС осуществляется с помощью автоматических газоанализаторов по содержанию в продуктах горения (дымовых газах) O_2. В промышленности и на парогенераторах малой мощности контроль процесса горения осуществляют иногда с помощью анализа продуктов горения на содержание CO_2. На рис. 21-1-1 представлены графики изменения содержания O_2 и CO_2 в продуктах полного горения в зависимости от коэффициента избытка воздуха для различных видов топлива. Из приведенного графика видно, что содержание CO_2 в продуктах полного горения является однозначной функцией избытка воздуха лишь для определенного вида топлива с постоянным составом.

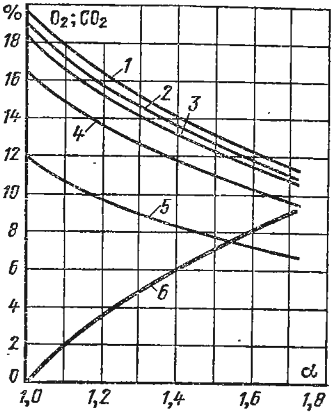


Рис. 21-1-1. Изменение содержания CO_2 и O_2 в продуктах полного горения в зависимости от α.

1 — фрезерный торф; *2* — подмосковный уголь и полуантрацит; *3* — тощий уголь; *4* — мазут; *5* — природный газ; *6* — O_2 для всех видов топлива.

При неполном горении содержание CO_2 в продуктах горения не является однозначной функцией α даже при постоянном составе топлива. При сжигании смеси двух видов топлива контроль продуктов горения по CO_2 не может быть осуществлен, так как небольшое изменение в соотношении смеси этих топлив приводит к изменению оптимального значения CO_2.

При контроле процесса горения по O_2 изменения в составе топлива или в количественном соотношении смеси различных видов топлива при $\alpha = \text{const}$ практически не влияет на содержание O_2 в продуктах горения. Кривая на рис. 21-1-1 показывает, что значение $O_2 = f(\alpha)$ для различных видов топлива при полном горении практически одинаково и мало отличается от теоретической зависимости.

Для контроля топочного режима при сжигании мазута и газа при малых избытках воздуха $\alpha = 1{,}01 \div 1{,}03$ необходимо применять автоматические газоанализаторы с диапазоном измерения от 0 до 2% O_2.

Для большей надежности наряду с содержанием O_2 в продуктах горения целесообразно контролировать также содержание CO, H_2 и CH_4; желательно дополнительно производить контроль по густоте дыма с помощью дымномера. Контроль густоты дыма необходим также из санитарных соображений для обеспечения чистоты атмосферного воздуха. Однако в настоящее время дымномеры серийно не выпускаются.

Газоанализаторы обычно градуируют в процентах по объему. Такой способ градуировки шкалы газоанализаторов удобен, так

как процентная доля отдельных компонентов в общем объеме остается неизменной при изменении давления и температуры газовой смеси.

21-2. Газоанализаторы химические

Газоанализаторы химические, относящиеся к группе механических приборов, основаны на измерении сокращения объема забранной пробы газа после удаления анализируемого компонента. Удаление компонента осуществляется методами избирательного поглощения или раздельного дожигания.

Так, например, из забранной пробы газа двуокись углерода поглощается водным раствором едкого кали, обладающим способностью избирательного поглощения CO_2:

$$2KOH + CO_2 = K_2CO_3 + H_2O.$$

Непоглощенный остаток анализируемого газа поступает в газоизмерительное устройство, где измеряется уменьшение объема, соответствующее поглощенному CO_2.

Этот метод применяется как в газоанализаторах переносных ручного действия типа ГХП2 и ГХП3 (ГОСТ 6329-52), называемых часто приборами Орса, так и в автоматических газоанализаторах.

Метод избирательного поглощения в сочетании с методом раздельного дожигания горючих составляющих анализируемой пробы газа дает возможность определить процентное содержание следующих компонентов газовой смеси CO_2 (или RO_2), O_2, CO, H_2, C_nH_m (суммы непредельных углеводородов), суммы метана CH_4 и других предельных углеводородов C_nH_{2n+2}. Данный метод применяется в переносном газоанализаторе типа ВТИ-2 (ГОСТ 7018-54) [88].

Рассмотрим переносные химические газоанализаторы ручного действия типа ГХП3 и ГХП2, получившие вследствие своей простоты широкое применение при испытании различных установок, а также для проверки автоматических газоанализаторов на CO_2 и O_2 как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях.

На рис. 21-2-1 показана схема устройства газоанализатора типа ГХП3. Он состоит из следующих основных частей: бюретки *1* для отмеривания первоначального объема газовой пробы и для измерения его уменьшения в результате поглощения; трех поглотительных сосудов *2*; распределительной гребенки *3* (для распределения газа между отдельными частями прибора). Правые концы поглотительных сосудов с помощью трубок соединены с резиновым мешком *4* для предохранения реактивов от соприкосновения с воздухом.

Бюретка, снабженная жидкостным затвором, изготовляется емкостью 100 мл с ценою деления шкалы 0,2 мл. Допускаемое отклонение показаний шкалы не превышает ±0,2 мл (ГОСТ 6329-52). Градуировка шкалы может быть выполнена в процентах от общего объема бюретки. Для увеличения точности измерения нижняя часть бюретки, составляющая 20% ее объема, значительно сужена. Для уменьшения влияния изменения температуры воздуха, окружающего прибор, бюретка помещена в стеклянный цилиндр *5*, заполненный водой. Бюретка вверху соединена резиновой трубкой с распределительной гребенкой, а внизу с помощью резинового шланга — с уравнительной склянкой *6*, в которую заливают затворную жидкость. В качестве затворной жидкости применяют насыщенный водный раствор поваренной соли, подкисленный серной или соляной кислотой и подкрашенный в розовый цвет метилоранжем. Применяя такую жидкость, можно заметить случайное попа-

дание в измерительную бюретку щелочи из поглотительных сосудов, так как в этом случае цвет затворной жидкости становится желтым.

Поглотительные сосуды в газоанализаторе ГХПЗ предназначены для определения в пробе газа CO_2, O_2 и CO. Однако при определении CO необходимо учитывать, что не все реактивы, применяемые для этой цели, являются надежными. Для увеличения поверхности соприкосновения между анализируемым газом и реактивом поглотительные сосуды заполнены стеклянными трубками.

Стеклянные краны *7*, *8* и *9* распределительной гребенки служат для соединения поглотительных сосудов с бюреткой. Распределительная гребенка снабжена трехходовым краном, который соединен с фильтром *11*, заполненным стеклянной ватой, и резиновой грушей *12*, предназначенной для подноса газа. Перед началом работы прибор должен быть проверен на плотность кранов и мест соединений.

Работа на газоанализаторе ГХПЗ производится в следующем порядке. С помощью резиновой груши продувают газоподводящую линию, а затем распределительную гребенку. В последнем случае газ забирают в бюретку и выдавливают

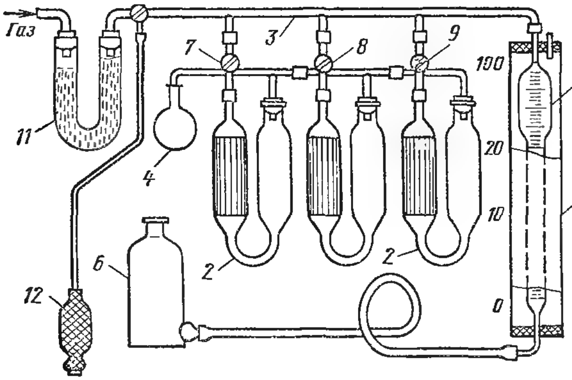


Рис. 21-2-1. Схема газоанализатора типа ГХПЗ.

в атмосферу через трехходовой кран. Перед взятием пробы газа для анализа уровень реактива в поглотительных сосудах должен быть доведен до контрольных меток под кранами, а уровень жидкости в бюретке — до верхней отметки. При заборе газа для анализа уравнительная склянка *6* медленно опускается и в бюретке создается разрежение; при этом трехходовой кран должен быть повернут так, чтобы гребенка прибора была соединена через фильтр *11* с линией подвода газа. Проба газа, забранная в бюретку, приводится к атмосферному давлению. Для этого уравнительную склянку опускают вниз так, чтобы уровень жидкости в бюретке был немного ниже нулевой отметки на шкале, и после этого отключают прибор от газоподводящей линии трехходовым краном. В таком положении охлаждают газ в бюретке в течение некоторого времени. После этого поднимают уравнительную склянку и газ в бюретке сжимают настолько, чтобы уровень жидкости в бюретке установился на нулевой отметке. Затем на мгновение сообщают бюретку через гребенку трехходовым краном с атмосферой и удаляют из прибора в атмосферу излишек газа, после чего отключают прибор трехходовым краном, а вместе с тем отсекают необходимый объем газа в бюретке при атмосферном давлении и температуре прибора.

Анализ газа начинают с определения процентного содержания CO_2 в пробе газа. Для этого кран соответствующего поглотительного сосуда открывают, медленно поднимают уравнительную склянку и вытесняют газ в поглотительный сосуд с раствором едкого кали, доводя уровень жидкости в бюретке до верхней конечной отметки на капиллярной трубке. Затем уравнительную склянку опускают до тех пор, пока реактив в поглотительном сосуде не дойдет до контрольной метки

под краном. Повторив эту операцию 4—5 раз, доводят реактив в поглотительном сосуде до контрольной метки и кран этого сосуда закрывают, уравнительную склянку устанавливают так, чтобы вода в ней и в бюретке была на одинаковом уровне. После этого производят отсчет по шкале, нанесенной на бюретке, уменьшения объема газа в результате поглощения. Затем делают контрольную прокачку, и если контрольный отсчет по шкале не дает изменения объема, считают, что CO_2 поглощено полностью.

Если анализируемый газ содержит двуокись серы (SO_2), то ее определяют совместно с CO_2. Сумму этих газов принято обозначать RO_2. В этом случае одновременно протекает следующая реакция:

$$2KOH + SO_2 = K_2SO_2 + H_2O.$$

После поглощения CO_2 остаток пробы газа вытесняют с помощью уравнительной склянки из бюретки в поглотительный сосуд с щелочным раствором пирогалловой кислоты для поглощения O_2. При определении процентного содержания O_2 ввиду медленного протекания реакции перекачивание газа в реактив необходимо повторять 6—7 раз. При этом необходима контрольная прокачка газа через реактив. Отсчет по шкале процентного содержания O_2 делается аналогично с CO_2.

Указанную очередность при определении CO_2 и O_2 необходимо соблюдать обязательно, так как раствор пирогалловой кислоты поглощает CO_2.

Аналогичным же образом определяют процентное содержание CO, перегоняя остаток газа через поглотительный сосуд с щелочным раствором полухлористой меди. Необходимо иметь в виду, что реактив для поглощения CO сравнительно быстро насыщается и портится, поэтому не всегда обеспечивает достаточную надежность определения CO. Следует также отметить, что этот реактив поглощает кислород.

Газоанализатор ГХП2 имеет два поглотительных сосуда и позволяет определять процентное содержание в газовой смеси CO_2, O_2 или CO. Устройство его в принципе аналогично с прибором ГХП3. Бюретка газоанализатора изготовляется емкостью 50 мл с ценой деления шкалы 0,1 мл. Допустимое отклонение показаний шкалы не превышает $\pm 0,1$ мл. Градуировка шкалы может быть выполнена в процентах от общего объема бюретки.

Наиболее употребительные реактивы для определения CO_2 и O_2 приготовляются следующим образом:

1. Для поглощения CO_2 берут 100 г едкого кали (KOH) на 200 мл дистиллированной воды. Максимальный предел поглощения 1 мл этого реактива равен 40 мл CO_2.

2. Для поглощения O_2 берут 40 г пирогаллола [$C_6H_3(OH)_3$] растворяют в 60 мл дистиллированной воды. Этот раствор смешивают со 140 мл 50%-ного раствора KOH. Лучше смешение растворов производить непосредственно в поглотительном сосуде, что в значительной степени уменьшит возможность окисления пирогаллола во время приготовления реактива. Допускаемая поглотительная способность 1 мл этого реактива составляет 2,3 мл O_2.

Автоматические химические газоанализаторы в настоящее время на ТЭС не применяются. Основным недостатком этих газоанализаторов является то, что они относятся к приборам периодического действия, дающим 20—30 анализов в час [34].

21-3. Тепловые газоанализаторы

К тепловым газоанализаторам относятся приборы, основанные на измерении тепловых свойств определяемого компонента газовой смеси, могущих быть мерой его концентрации. В качестве измеряемых величин в газоанализаторах этого типа используются теплопроводность газовой смеси и полезный тепловой эффект реакции каталитического окисления, которые зависят от концентра-

ции определяемого компонента. Тепловые газоанализаторы подразделяются на газоанализаторы термокондуктометрические (по теплопроводности газовой смеси) и термохимические (по полезному тепловому эффекту реакции каталитического окисления).

Газоанализаторы термокондуктометрические. Газоанализаторы, основанные на измерении теплопроводности анализируемой газовой смеси, применяются для определения процентного содержания какого-либо одного компонента: двуокиси углерода (CO_2), водорода (H_2), аммиака (NH_3), гелия (He), хлора (Cl_2) и других газов, имеющих резко отличные коэффициенты теплопроводности по сравнению с другими компонентами смеси. Анализ многокомпонентной газовой смеси по ее теплопроводности можно производить при условии, что все компоненты газовой смеси, кроме определяемого, имеют одинаковую теплопроводность. Если в газовой смеси имеются компоненты, которые могут исказить результаты анализа, то, как будет показано ниже, тем или иным способом устраняют их влияние.

В табл. 21-3-1 приводятся значения теплопроводности λ, температурные коэффициенты теплопроводности β и отношения теплопроводности некоторых газов к теплопроводности воздуха λ_{100} при температуре 100° С.

Таблица 21-3-1

Теплопроводность λ, температурные коэффициенты теплопроводности β и отношения теплопроводности некоторых газов к теплопроводности воздуха γ_{100} при температуре 100° С

Газ	$\lambda \cdot 10^4$, Вт·м·К$^{-1}$							γ_{100}	$\beta \cdot 10^4$ К$^{-1}$
	Температура, °С								
	0	100	200	300	400	500	600		
Воздух	244	321	393	461	521	574	623	1,0	29
Азот N_2	243	315	385	449	506	558	603	0,98	28
Водород H_2	1721	2197	2640	3070	3477	3873	4268	6,84	27
Двуокись углерода CO_2	146	228	309	391	472	549	621	0,71	48
Двуокись серы SO_2	84	123	166	212	258	306	358	0,38	—
Кислород O_2	247	329	407	480	550	615	674	1,02	28
Метан CH_4	307	465	635	823	1020	1221	1442	1,45	48
Окись углерода CO	233	301	365	426	485	531	597	0,94	28
Пары воды H_2O	170	250	333	424	546	667	818	0,78	—
Аргон Ar	165	212	257	299	340	379	394	0,66	30
Гелий He	1431	1791	2128	2442	2756	3047	3326	5,56	18
Хлор Cl_2	79	—	—	—	—	—	—	—	—

Значение теплопроводности зависит от температуры, и, так как температурные коэффициенты теплопроводности газов неодинаковы, при повышенных температурах теплопроводности некоторых газов оказываются равными теплопроводности воздуха. Например, для CO_2 такое равенство наступает при 600° С. При этой температуре анализ газов с целью определения CO_2 по суммарной теплопроводности газовой смеси невозможен. Для анализа по теплопровод-

ности газовой смеси наиболее благоприятный температурный режим обеспечивается при 80—100° С.

Продукты горения обычно содержат N_2, O_2, CO, CO_2 и CH_4, а также H_2, SO_2 и водяные пары. Теплопроводности N_2, CO, O_2 почти одинаковы, поэтому при выборе соответствующей температуры (например, близкой к 100° С) определение CO_2 может производиться с достаточной точностью. Метан обычно присутствует в продуктах горения в незначительном количестве и существенного влияния на теплопроводность газовой смеси не оказывает. Наличие водорода в продуктах горения приводит к значительному искажению (приуменьшению) результата измерения содержания CO_2, так как теплопроводность H_2 велика (см. табл. 21-3-1). Поэтому при определении CO_2 в продуктах горения, содержащих водород, необходимо перед впуском газа в приемный преобразователь газоанализатора дожигать H_2 в специальной печи. При этом содержание CO_2 может быть несколько преувеличено за счет одновременного сжигания также и CO. Это можно учесть и внести поправку, если имеется прибор для определения CO. Сернистый газ необходимо удалить с помощью фильтра, заполненного обезжиренной стальной (железной) стружкой и некоторым объемом воды. Следует отметить, что 1% SO_2 преувеличивает показания газоанализатора примерно на 1,7% CO_2. Кроме того, SO_2 является агрессивным газом, вызывающим коррозию металлических частей прибора.

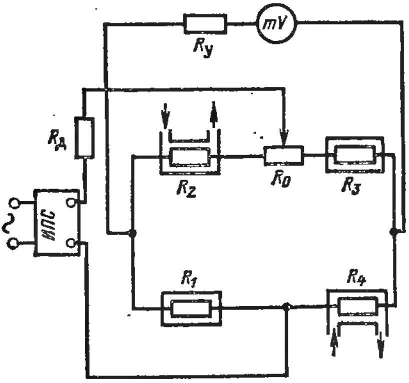


Рис. 21-3-1. Принципиальная измерительная мостовая схема термокондуктометрического газоанализатора.

Температура и влажность отбираемой пробы газовой смеси могут колебаться в достаточно широких пределах. Поэтому для уменьшения влияния переменного состава водяных паров на результаты анализа, а также для снижения температуры и влажности пробу газовой смеси охлаждают до определенной температуры с помощью водяного холодильника. Это позволяет стабилизировать температуру и влажность газовой смеси, поступающей в приемный преобразователь газоанализатора. В некоторых случаях, например в газоанализаторах, предназначенных для определения CO_2 в бинарных смесях с повышенной или переменной влажностью, для стабилизации ее перед приемным преобразователем газоанализатора устанавливают барботеры, в которых сравнительный и анализируемый газы увлажняются до насыщения.

Принципиальная схема газоанализатора на CO_2 и H_2 приведена на рис. 21-3-1. Газоанализатор состоит из приемного преобразова-

теля с мостовой измерительной схемой, линии связи, вторичного измерительного прибора (например, милливольтметра) и источника питания. Плечи моста приемного преобразователя R_2 и R_4, являющиеся рабочими чувствительными элементами, изготовлены из тонкой платиновой проволоки (обычно диаметром 0,02—0,04 мм и сопротивлением 10 или 40 Ом) и помещены в измерительные камеры, через которые протекает анализируемая газовая смесь. Два других плеча моста R_1 и R_3, выполненные также из платиновой проволоки, представляют собой чувствительные элементы, помещенные в герметически закрытые камеры, заполненные сравнительным газом. В газоанализаторах, предназначенных для определения CO_2 в газовой смеси, сравнительным газом является воздух. Имеются газоанализаторы, у которых плечи моста R_1 и R_3 не находятся в закрытых камерах, а аналогично рабочим чувствительным элементам непрерывно омываются сравнительным газом.

Питание мостовой измерительной схемы современных газоанализаторов осуществляется постоянным током от источника стабилизированного питания (ИПС). Резистор $R_д$, включенный в цепь питания, предназначен для установки тока питания моста при градуировке газоанализатора на заводе-изготовителе.

Для уменьшения влияния колебания температуры воздуха, окружающего приемный преобразователь газоанализатора, необходимо, чтобы было соблюдено равенство сопротивлений чувствительных элементов ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$) с наивысшей степенью точности. При протекании через газовые камеры воздуха мост должен быть электрически уравновешен и указатель милливольтметра должен находиться на отметке, соответствующей начальному значению шкалы. Незначительные отклонения от равновесия схемы в тот момент, когда все четыре чувствительных элемента омываются воздухом, устраняются с помощью регулируемого резистора R_0. Сопротивление этого резистора составляет примерно 0,15 Ом.

Для подгонки сопротивления линии связи до заданного значения служит резистор $R_у$. Параллельно с показывающим измерительным прибором может быть включен также и самопишущий милливольтметр. В этом случае градуировка газоанализатора должна быть выполнена с учетом сопротивления второго вторичного прибора и определенного значения сопротивления линии связи.

При омывании чувствительных элементов R_2 и R_4 анализируемым газом, содержащим CO_2 (H_2 и SO_2 отсутствуют), изменяются условия теплоотдачи от чувствительных элементов R_2 и R_4 к стенкам камер вследствие того, что теплопроводность анализируемого газа благодаря наличию CO_2 иная, чем сравнительного газа (воздуха). В силу этого температура чувствительных элементов R_2 и R_4 возрастает, а следовательно, увеличивается их сопротивление. При этом на вершинах в диагонали моста из-за нарушения электрического равновесия схемы появится напряжение и указатель милливольтметра отклонится на некоторый угол. Это напряжение является функцией сопротивления чувствительных элементов R_2

и R_4 или, иначе говоря, функцией объемного процентного содержания CO_2 в анализируемой газовой смеси.

Пределы допускаемой основной погрешности газоанализаторов, выполненных по схеме рис. 20-3-1, для определения CO_2 в газовой смеси не превышают 2—2,5% диапазона измерения. Изменение показаний газоанализаторов этого типа при изменении температуры окружающего воздуха от $20 \pm 5°$ С до любой температуры в пределах от 5 до 50° С на каждые 10° С не превышает ± 2 — 2,5% диапазона измерения.

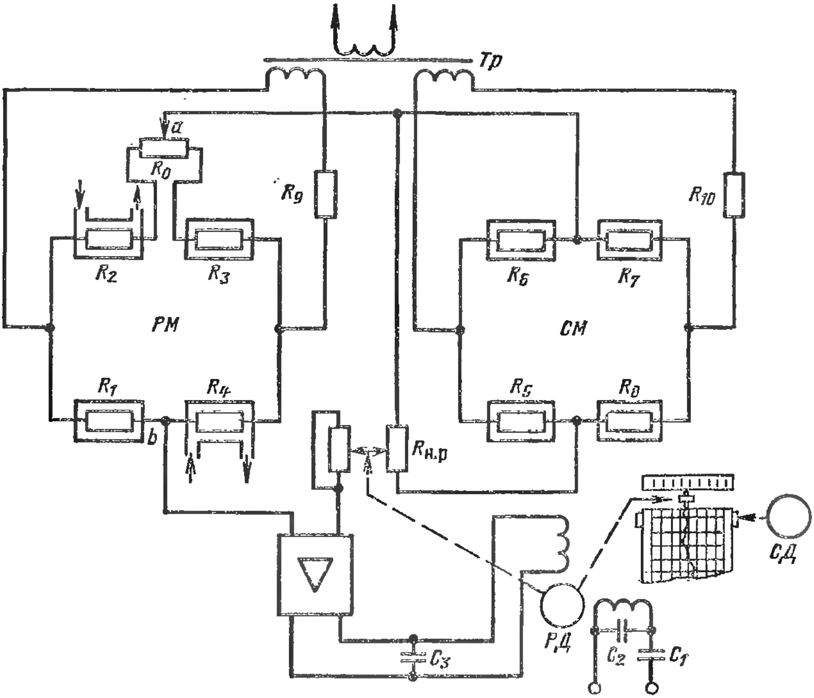


Рис. 21-3-2. Принципиальная компенсационная измерительная схема термокондуктометрического газоанализатора на CO_2 или H_2.

Рассмотрим компенсационно-мостовую измерительную схему газоанализатора, предназначенного для измерения объемной концентрации CO_2 в продуктах горения или H_2 в системах водородного охлаждения турбогенераторов. Принципиальная компенсационная измерительная схема, применяемая в газоанализаторах на CO_2 или H_2, разработанных СКБ аналитического приборостроения АН СССР и серийно выпускаемых Выруским заводом газоанализаторов, показана на рис. 21-3-2. Приемный преобразователь газоанализатора состоит из двух измерительных мостов: рабочего *РМ* и сравнительного *СМ*. Мосты преобразователя питаются переменным

током напряжением 6,5 В от двух вторичных обмоток трансформатора Tp, подключенного к стабилизатору, питаемому от сети напряжением 127 или 220 В, частотой 50 Гц. В качестве вторичного прибора в газоанализаторах этого типа используется электронный прибор, выполненный на базе автоматических уравновешенных мостов типа КСМ2 и др., снабженный реохордом $R_{н.р}$.

Реохорд вторичного прибора включен в измерительную диагональ сравнительного моста преобразователя. К токоотводу реохорда и к нижней вершине рабочего моста преобразователя подключен вход электронного усилителя.

Чувствительные элементы рабочего моста R_2 и R_4 находятся в измерительных камерах и омываются анализируемой газовой смесью. В газоанализаторах типа ТП2220, предназначенных для определения CO_2, чувствительные элементы рабочего моста R_1 и R_3 помещены в закрытые камеры, заполненные воздухом. Чувствительные элементы сравнительного моста R_6 и R_8 находятся в закрытых камерах, заполненных газовой смесью (воздух + 20% CO_2), соответствующей конечному значению шкалы. Два других чувствительных элемента сравнительного моста (R_5, R_7) находятся также в закрытых камерах, заполненных воздухом, что соответствует начальному значению шкалы. Резисторы R_9 и R_{10} предназначены для установки тока питания рабочего и сравнительного мостов при градуировке газоанализаторов. Резистор R_0 служит для корректировки нуля газоанализатора, когда чувствительные элементы рабочего моста R_2 и R_4 омываются воздухом.

При равновесии измерительной схемы преобразователя напряжение на вершинах рабочего моста ab уравновешивается частью напряжения, снимаемого с реохорда выше движка. В этом случае напряжение на входе усилителя практически равно нулю. При изменении концентрации CO_2 в газовой смеси напряжение на вершинах рабочего моста изменится и на входе усилителя появляется напряжение разбаланса, которое усиливается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя. Выходной вал реверсивного двигателя через систему кинематической передачи воздействует на движок реохорда, изменяя компенсирующее напряжение на верхнем участке реохорда до тех пор, пока оно не уравновесит напряжение на вершинах рабочего моста U_{ab}. Одновременно валом реверсивного двигателя приводят в действие каретку с указателем и пером, фиксируя значение измеряемой концентрации CO_2 в анализируемой газовой смеси.

Условию равновесия измерительной схемы отвечает выражение

$$U_{ab} = mU_{р},$$

где m — отношение длины участка реохорда выше движка к полной его длине; $U_р$ — падение напряжения на рабочей длине реохорда.

Газоанализаторы типа ТП1120, применяемые для определения H_2 в системе водородного охлаждения турбогенераторов, имеют шкалу

80—100% H_2. У этих газоанализаторов измерительные камеры рабочего моста с чувствительными элементами R_1 и R_3 заполнены газовой смесью (80% H_2 + 20% воздуха), соответствующей начальному значению шкалы. Камеры чувствительных элементов в сравнительном мосте (R_6 и R_8) заполнены 100% H_2, что соответствует конечному значению шкалы, а камеры чувствительных элементов R_5 и R_7 — газовой смесью (80% H_2 + 20% воздуха), соответствующей начальному значению шкалы.

Газоанализаторы с другими диапазонами измерений отличаются от рассмотренных приборов только процентным содержанием газовой смеси в закрытых камерах рабочего и сравнительного мостов.

Основным преимуществом компенсационной измерительной схемы является то, что показания газоанализаторов в меньшей степени зависят от колебаний напряжения питания и от изменения температуры воздуха, окружающего приемный преобразователь, так как эти влияющие величины одинаково действуют на рабочий и сравнительный мосты. Изменения показаний газоанализатора при изменении температуры воздуха, окружающего преобразователь, будут тем меньше, чем с большей точностью соблюдено равенство сопротивлений чувствительных элементов мостов.

Компенсационная измерительная схема позволяет создавать газоанализаторы для измерения малых концентраций определяемого компонента в бинарных и многокомпонентных газовых смесях. В этом случае приемный преобразователь снабжается двумя рабочими мостами и одним сравнительным мостом. Для устранения влияния на показания газоанализатора переменного содержания какого-либо неопределяемого компонента газовой смеси компенсационная измерительная схема позволяет кроме рабочего и сравнительного мостов включить в схему компенсационный мост. Рассмотренная измерительная схема газоанализатора позволяет также осуществлять автоматическую корректировку возможного изменения показаний и от других влияющих величин.

Для газоанализаторов, показанных на рис. 21-3-2, сопротивление каждого провода, соединяющего приемный преобразователь с реохордом вторичного прибора, должно быть равно 2,5 ± 0,05 Ом. Пределы допускаемой основной погрешности ± 2,5% диапазона измерения. Изменения показаний газоанализаторов при изменении температуры окружающего воздуха от 20 ± 5° С до любой температуры в пределах от 5 до 50° С на каждые 10° С не превышают ± 2% диапазона измерения. Изменение показаний газоанализаторов при изменении напряжения питания на ±10% не более ±2,5% диапазона измерения. Запаздывание показаний газоанализаторов при изменении концентрации газовой смеси на входном штуцере приемного преобразователя не превышает 4 мин.

Рассмотрим устройство рабочих и сравнительных чувствительных элементов и измерительных камер, применяемых в термокондуктометрических газоанализаторах. Устройство измерительных камер приемного преобразователя газоанализатора должно быть

таково, чтобы незначительные колебания скорости газового потока не вызывали изменения показаний прибора при одном и том же процентном содержании определяемого компонента в анализируемой газовой смеси. Температура стенок рабочих и сравнительных камер преобразователя должна быть одинакова. Для этой цели измерительные камеры выполняются массивными и из высокотеплопроводного материала.

В газоанализаторах с компенсационно-мостовой измерительной схемой применяются чувствительные элементы в стеклянных ампулах, показанные на рис. 21-3-3 [89]. Чувствительные элементы *а* и *б* имеют сопротивление 10 Ом, а чувствительные элементы *в* и *г* — 40 Ом. Чувствительные элементы *в* и *г* обладают лучшей механической надежностью и химической устойчивостью, однако при их применении несколько увеличится инерционность приемного преобразователя газоанализатора. Запаянные стеклянные ампулы с чувствительными элементами *б* и *г* заполняются газовой смесью в зависимости от определяемого компонента в анализируемой газовой смеси, диапазона измерения и применяемой измерительной схемы (рис. 21-3-2).

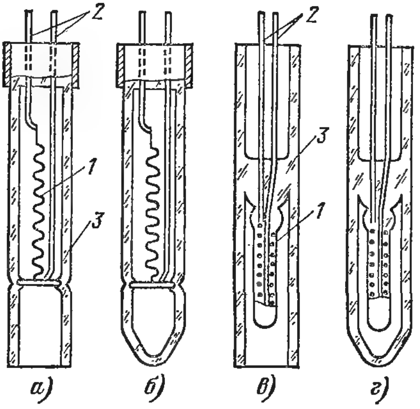


Рис. 21-3-3. Устройство рабочих (*а*, *в*) и сравнительных (*б*, *г*) чувствительных элементов в стеклянных ампулах с открытой (*а*, *б*) и остеклованной (*в*, *г*) платиновой спиралью.

1 — платиновая спираль ⌀ 0,02 мм; *2* — платинородиевые токоподводы ⌀ 0,15 мм; *3* — стекло.

Все чувствительные элементы приемного преобразователя газоанализатора устанавливают в вертикальных камерах (каналах) общего массивного блока с одним или двумя горизонтальными центральными каналами, через которые протекает анализируемый газ. Указанное расположение чувствительных элементов в блоке обеспечивает одинаковые условия их работы. Блок для чувствительных элементов в зависимости от агрессивных свойств анализируемой газовой смеси изготовляют из латуни, нержавеющей стали и других материалов.

На рис. 21-3-4 показана схема камеры приемного преобразователя термокондуктометрического газоанализатора, в которой установлен чувствительный элемент с остеклованной платиновой спиралью. Как видно из схемы, анализируемый газ протекает через горизонтальный канал, перпендикулярный каналу камеры. Газ поступает в камеру, омывая чувствительный элемент, только за счет диффузии. Чувствительный элемент может быть также установлен в вертикальном прямоточном канале. В этом случае чувстви-

тельный элемент непосредственно омывается потоком анализируемого газа.

При диффузионном подводе газа в камеру показания газоанализатора в значительно меньшей степени зависят от расхода газовой пробы. При установке чувствительных элементов в прямоточных каналах приемный преобразователь будет иметь меньшую инерционность, но в этом случае на показания газоанализатора будет значительно влиять изменение расхода анализируемого газа.

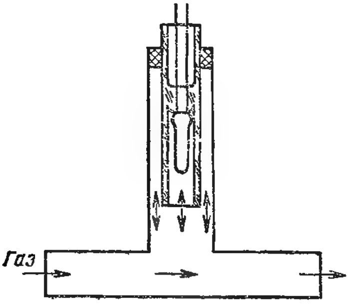


Рис. 21-3-4. Схема камеры приемного преобразователя газоанализатора с диффузионным подводом анализируемого газа.

Термохимические газоанализаторы. Из числа термохимических газоанализаторов наибольшее распространение получили газоанализаторы, основанные на измерении полезного теплового эффекта реакции каталитического окисления (горения) определяемого компонента анализируемой газовой смеси. Газоанализаторы этого типа находят применение для определения $CO + H_2$ или CO в продуктах горения и в других газовых смесях, а также CH_4 в рудничной атмосфере.

Имеются две модификации термохимических газоанализаторов, в которых используется реакция каталитического окисления. К первой модификации относятся газоанализаторы, в которых реакция каталитического горения определяемого компонента осуществляется на поверхности на гретой каталитически активной тонкой проволоки (например, платиновой). Эта проволока является одновременно чувствительным элементом.

Ко второй модификации относятся газоанализаторы, в которых каталитическое окисление определяемого компонента осуществляется на твердом гранулированном катализаторе при протекании через него анализируемой газовой смеси. В этом случае полезный тепловой эффект каталитического горения измеряют в рабочей камере с помощью чувствительного элемента, выполненного из тонкой платиновой проволоки или термобатареи. В переносном газоанализаторе для определения CH_4 в рудничной атмосфере каталитическое горение осуществляется на твердом шарообразном катализаторе, выполненном из окиси алюминия, с нанесенной на его пористую поверхность платинопалладиевого катализатора. Внутри шарообразного катализатора находится платиновая спираль, которая выполняет функции чувствительного элемента. Такое выполнение чувствительного элемента обеспечивает более высокую надежность и стабильность характеристик прибора по сравнению с газоанализаторами первой модификации.

Мостовая измерительная схема термохимического газоанализатора показана на рис. 21-3-5. Газоанализатор состоит из приемного

преобразователя, линии связи ($R_у$ — резистор для подгонки сопротивления линии связи до заданного значения), вторичного измерительного прибора (милливольтметра) и источника стабилизированного питания (ИПС).

Плечи неуравновешенного моста приемного преобразователя R_2 и R_3, являющиеся соответственно рабочим и сравнительным чувствительными элементами, изготовлены из тонкой платиновой проволоки. Рабочий чувствительный элемент R_2, на поверхности которого происходит каталитическое горение определяемого компонента, помещен в камеру. Через эту камеру непрерывно протекает анализируемый газ. Сравнительный чувствительный элемент R_3, аналогичный по устройству рабочему, помещен в герметически закрытую камеру, заполненную воздухом. Плечи моста R_1 и R_4 выполнены из манганиновой проволоки.

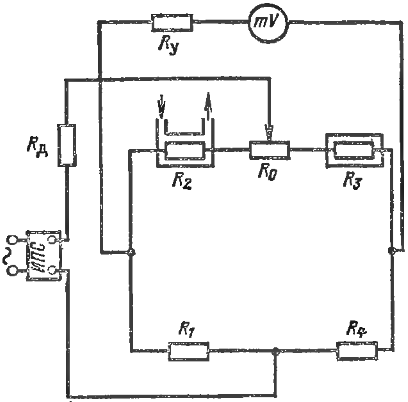


Рис. 21-3-5. Принципиальная измерительная мостовая схема термохимического газоанализатора.

Рабочий и сравнительный чувствительные элементы нагреваются до определенной температуры (не менее 200—400° С в зависимости от катализатора и определяемого компонента) постоянным током. Небольшие колебания напряжения питания и температуры воздуха, окружающего приемный преобразователь, практически не вызывают изменения показаний газоанализатора.

В рабочей камере горение в присутствии катализатора происходит за счет свободного кислорода в анализируемом газе или за счет дополнительно поступающего через специальное сопло камеры воздуха в количестве около 30% общего объема анализируемого газа. Благодаря выделению тепла при сгорании определяемого компонента возрастает температура чувствительного элемента R_2, а следовательно, и его сопротивление, вследствие чего равновесие моста нарушается. Разность потенциалов, возникшая при этом на вершинах моста, будет пропорциональна количеству выделившегося тепла, а следовательно, и содержанию определяемого компонента в анализируемом газе. Это дает возможность градуировать шкалу милливольтметра непосредственно в процентах по объему CO, $CO + H_2$ или CH_4.

Для коррекции нуля газоанализатора служит регулируемый резистор R_0. В момент проверки нуля чувствительные элементы R_2 и R_3 омываются воздухом.

21-4. Магнитные газоанализаторы

Общие сведения. Магнитные газоанализаторы на кислород, основанные на измерении магнитных свойств кислорода, получили широкое применение в различных отраслях промышленности для определения концентрации кислорода в газовых смесях, и, в частности, в продуктах горения.

Магнитные свойства газов обычно характеризуют значениями объемной магнитной восприимчивости и удельной или массовой магнитной восприимчивости. Все известные газы по характеру и абсолютным значениям магнитных свойств разделяются на диамагнитные и парамагнитные.

Для неферромагнитных веществ, к которым относятся газы, намагниченность J или интенсивность намагничивания (т. е. сумма магнитных моментов, приходящихся на единицу объема) пропорциональна напряженности магнитного поля H:

$$J = \varkappa H, \qquad (21\text{-}4\text{-}1)$$

где $\varkappa$ — коэффициент пропорциональности, называемый объемной магнитной восприимчивостью вещества. Для диамагнитных веществ $\varkappa$ имеет отрицательное значение, так как прецессионные круговые токи ослабляют внешнее поле, т. е. оси их имеют противоположное внешнему магнитному полю направление. Диамагнитные явления выражены весьма слабо.

Для парамагнитных веществ $\varkappa$ имеет положительное значение, так как под действием внешнего магнитного поля оси магнитных моментов молекулярных круговых токов, образованных вращением электронов вокруг ядра атомов, наклоняются в сторону внешнего поля, в силу чего оно усиливается.

Следует отметить, что вследствие незначительности энергии молекулярного кругового тока в магнитном поле по сравнению с энергией теплового движения отдельных молекул и атомов внутри неферромагнитного вещества явление парамагнетизма, хотя оно и значительно больше по сравнению с явлением диамагнетизма, проявляется также очень слабо.

Удельная магнитная восприимчивость χ определяется отношением объемной магнитной восприимчивости $\varkappa$ к плотности газа ρ:

$$\chi = \frac{\varkappa}{\rho}. \qquad (21\text{-}4\text{-}2)$$

Плотность газа в зависимости от абсолютного давления p и температуры T определяется выражением

$$\rho = \frac{pM}{TR}, \qquad (21\text{-}4\text{-}3)$$

где M — молекулярная масса; R — газовая постоянная.

Значения плотности для наиболее распространенных газов в нормальном состоянии приведены в табл. П14-3-2. Плотность газа или

смеси газов в рабочем состоянии при p и T может быть определена по формулам, приведенным в § 14-5.

Удельная магнитная восприимчивость диамагнитных газов не зависит от агрегатного состояния газа, температуры и давления. Объемная магнитная восприимчивость диамагнитных газов с учетом приведенных выше выражений равна:

$$\varkappa = \chi\rho = \chi \frac{pM}{TR}, \tag{21-4-4}$$

или

$$\varkappa = \varkappa_0 \frac{pT_0}{Tp_0}, \tag{21-4-5}$$

где $\varkappa_0$ — объемная магнитная восприимчивость при нормальных температуре $T_0 = 273$ К и давлении $p_0 = 1{,}0332$ кгс/см². Из выражения (21-4-4) видно, что $\varkappa$ для диамагнитных газов при постоянном давлении обратно пропорциональна температуре.

Удельная магнитная восприимчивость парамагнитных газов зависит от температуры. Это объясняется тем, что в нейтральном состоянии направление осей магнитных моментов молекулярных круговых токов ориентированы хаотично, но при наличии внешнего магнитного поля оси магнитных моментов стремятся расположиться вдоль этого поля. Тепловое движение отдельных молекул и атомов внутри вещества мешает этому, и, следовательно, эффект уменьшается с ростом температуры. Это положение лежит в основе закона Кюри, согласно которому для кислорода χ обратно пропорциональна абсолютной температуре T [1]:

$$\chi = \frac{C}{T}, \tag{21-4-6}$$

где C — постоянная Кюри.

Объемная магнитная восприимчивость парамагнитных газов с учетом выражений (21-4-2), (21-4-3) и (21-4-6) равна:

$$\varkappa = C\frac{\rho}{T} = C\frac{pM}{RT^2}, \tag{21-4-7}$$

или

$$\varkappa = \varkappa_0 \frac{pT_0^2}{p_0T^2}. \tag{21-4-8}$$

Из этого уравнения следует, что объемная магнитная восприимчивость зависит от температуры и давления, а следовательно, и от плотности газа.

Объемная магнитная восприимчивость смеси газов при отсутствии химического взаимодействия определяется по формуле

$$\varkappa_{\text{см}} = v\varkappa + \sum_{i=1}^{n} v_i\varkappa_i = v\varkappa + (1 - v)\,\varkappa_{\text{н}}, \tag{21-4-9}$$

---

[1] Парамагнитные газы NO и NO_2 не подчиняются закону Кюри [90].

где v — объемная концентрация кислорода в смеси (в долях единицы); $\varkappa$ — магнитная восприимчивость кислорода; v_i — объемная концентрация i-го некислородного компонента смеси (в долях единицы); $\varkappa_i$ — магнитная восприимчивость i-го некислородного компонента смеси; $\varkappa_н$ — магнитная восприимчивость некислородной части смеси.

Если газовые смеси (например, продукты горения и промышленные газы) состоят из кислорода и диамагнитных газов, то уравнение (21-4-9) с учетом (21-4-5) и (21-4-8) принимает вид:

$$\varkappa_{см} = \frac{T_0 p}{T p_0}\left[v\varkappa_0 \frac{T_0}{T} + (1 - v)\,\varkappa_{0д}\right]. \qquad (21\text{-}4\text{-}10)$$

где $\varkappa_{0д}$ — магнитная восприимчивость диамагнитной части смеси при нормальных температуре T_0 и давлении p_0.

Из изложенного выше следует, что объемная магнитная восприимчивость газовой смеси зависит от магнитных свойств всех входящих в нее компонентов, а также от температуры и давления газа.

В табл. 21-4-1 приведены значения объемной магнитной восприимчивости некоторых газов при 0° С. Из приведенной таблицы видно, что кислород обладает значительно большей магнитной восприимчивостью по сравнению с другими газами. Благодаря этому представляется возможность использовать магнитные свойства кислорода для избирательного определения его концентрации в промышленных газовых смесях. Как видно из таблицы, лишь два газа — окись и двуокись азота — имеют относительно большую магнитную восприимчивость. Однако эти газы встречаются очень редко в смесях промышленных газов.

Таблица 21-4-1

Объемная магнитная восприимчивость некоторых газов при 0° С

Газ	$\varkappa \cdot 10^{10}$ (СИ)	Магнитная восприимчивость по отношению к кислороду	Газ	$\varkappa \cdot 10^{10}$ (СИ)	Магнитная восприимчивость по отношению к кислороду
Кислород O_2	116,24	1,0	Водород H_2	—0,13	—0,0011
Воздух (21% O_2)	24,52	0,211	Азот N_2	—0,46	—0,004
Окись азота NO	42,20	0,363	Двуокись углерода CO_2	—0,67	—0,0057
Двуокись азота NO_2	7,16	0,0616	Аммиак NH_3	—0,67	—0,0057
Метан CH_4	—1,43	—0,0123	Водяные пары H_2O	—0,46	—0,004

Абсолютное значение объемной магнитной восприимчивости кислорода, как видно из табл. 21-4-1, весьма мало и может быть точно измерено лишь специальными высокочувствительными методами. Поэтому в существующих магнитных газоанализаторах для измерения концентрации кислорода в газовых смесях используются косвенные методы, т. е. те или иные физические явления, связанные

с магнитными свойствами кислорода. К таким явлениям, используемым для создания магнитных газоанализаторов, относятся следующие:

1. В среде парамагнитного газа при наличии нагретого тела и неоднородного магнитного поля возникает термомагнитная конвекция (магнитный ветер), вызывающая охлаждение тела.

2. Парамагнитный газ, находящийся в магнитном поле, изменяет свою теплопроводность.

3. Парамагнитный газ при наличии магнитного поля изменяет свою вязкость.

4. Тело, находящееся в парамагнитной газовой среде и неоднородном магнитном поле, испытывает выталкивающее или втягивающее воздействие при одновременном изменении магнитной восприимчивости окружающего его газа.

В соответствии с физическим явлением, положенным в основу принципа работы прибора, магнитные газоанализаторы подразделяют на четыре группы по ГОСТ 13320-67: 1) термомагнитные; 2) магнитотермокондуктометрические; 3) магнитовискозиметрические; 4) магнитомеханические — роторные, эффузионные (безроторные).

Подробные сведения о принципах построения, теории и методике инженерных расчетов магнитных газоанализаторов приведены в монографии Д. И. Агейкина [90].

Ниже рассматриваются термомагнитные газоанализаторы, которые широко применяются для измерения концентрации кислорода в продуктах горения и в смесях промышленных газов.

Термомагнитные газоанализаторы. Термомагнитные газоанализаторы основаны на использовании явления термомагнитной конвекции парамагнитного газа, возникающей при наличии неоднородного магнитного поля и нагретого тела (температурного градиента). Между термомагнитной конвекцией и естественной тепловой конвекцией (свободным движением) имеется аналогия. Известно, что естественная тепловая конвекция возникает около горячей (или холодной) поверхности, окруженной газом (жидкостью), при наличии гравитационного поля. От соприкосновения с горячей поверхностью тела газ нагревается, его температура по сравнению с температурой остальной массы повышается, а плотность уменьшается. Вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц газа возникает подъемная сила, под действием которой нагретые частицы поднимаются кверху, т. е. в сторону падения гравитационного поля. На их место поступают другие, холодные частицы, которые также нагреваются и поднимаются. Возникновение и интенсивность естественной конвекции всецело определяются тепловыми условиями процесса и зависят от рода жидкости, разности температур и объема пространства, в котором протекает процесс.

В термомагнитном газоанализаторе анализируемый парамагнитный газ, протекающий непрерывно в канале, втягивается в специальную измерительную камеру с магнитной системой, между полю-

сами которой находится нагреваемый током чувствительный элемент (рис. 21-4-1). Газ, соприкасаясь с чувствительным элементом, нагревается, и магнитная восприимчивость его уменьшается. Вследствие этого нагретый газ выталкивается из магнитного поля холодным газом, протекающим в канале, и около нагретого чувствительного элемента возникает непрерывный поток газа (на рис. 21-4-1 показан пунктирными стрелками), движущийся в сторону падения напряженности магнитного поля. Этот поток газа, носящий название термомагнитной конвекции или магнитного ветра, охлаждает чувствительный элемент. Интенсивность термомагнитной конвекции, зависящую от магнитной восприимчивости парамагнитного газа, оценивают по изменению электрического сопротивления чувствительного элемента, вызванного его охлаждением. Для измерения изменения сопротивления чувствительного элемента применяют неуравновешенную мостовую или компенсационную мостовую схему.

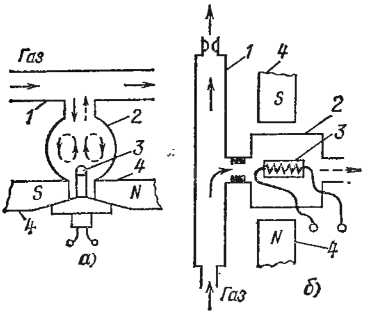


Рис. 21-4-1. Схемы измерительных камер приемного преобразователя термомагнитного газоанализатора.

а — с диффузионным подводом газа; *б* — прямоточная со сбросом части газа; *1* — канал, по которому протекает анализируемый газ; *2* — измерительная камера; *3* — чувствительный элемент; *4* — постоянный магнит.

Магнитное поле в зоне чувствительного элемента обычно создают с помощью постоянного магнита. Неоднородное магнитное поле, как правило, возникает вблизи кромок полюсов постоянного магнита, около которых в измерительной камере располагают чувствительный элемент или нагреватель.

Рассмотрим силы, действующие на единичный объем кислородосодержащей газовой смеси, нагретый до температуры T_2 и окруженный смесью газа того же состава с температурой T_1.

Сила, обусловленная тепловой конвекцией при наличии гравитационного поля с ускорением свободного падения g, равна:

$$q_т = (\rho_1 - \rho_2) g, \tag{21-4-11}$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотность газовой смеси при давлении p и температурах T_1 и T_2.

С учетом выражений (14-5-2), (14-5-3) и (14-5-6) уравнение (21-4-11) принимает вид:

$$q_т = \rho_{0\,см} g \frac{T_0 p}{p_0 K_{см}} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right), \tag{21-4-12}$$

где $\rho_{0см}$ — плотность газовой смеси при $T_0 = 273$ К и $p_0 = 1{,}0332$ кгс/см^2.

Сила термомагнитной конвекции, действующая в направлении падения напряженности поля H, равна:

$$q_м = \frac{1}{2}(\varkappa_1 - \varkappa_2) \operatorname{grad}(H^2) = (\varkappa_1 - \varkappa_2) H \frac{dH}{dx}, \qquad (21\text{-}4\text{-}13)$$

где $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$ — магнитная восприимчивость газовой смеси при давлении p и температурах T_1 и T_2; x — координата.

После замены $\varkappa_1$ и $\varkappa_2$ в уравнении (21-4-13) согласно (21-4-10) получим:

$$q_м = \frac{T_0 p}{p_0}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\left[v\varkappa_0 T_0\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) + (1 - v)\varkappa_{0д}\right] H \frac{dH}{dx}. \qquad (21\text{-}4\text{-}14)$$

Следует отметить, что сила $q_т$ всегда сопутствует силе $q_м$, причем они могут иметь различные направления в пространстве. Вследствие этого результирующая сила q определяется как сумма векторов:

$$q = q_т + q_м. \qquad (21\text{-}4\text{-}15)$$

Непосредственное измерение силы $q_м$ не производят, так как это сопряжено с большими трудностями. В широко используемых термомагнитных газоанализаторах применяют, как отмечалось выше, метод измерения интенсивности термомагнитной конвекции с помощью чувствительного элемента, который одновременно является и нагревателем. Этот метод обладает достаточно высокой чувствительностью. Возможен вариант реализации этого метода при конструктивном разделении нагревателя и чувствительного элемента, но такая модификация метода широкого распространения не получила.

Процесс теплообмена нагретого чувствительного элемента, установленного в измерительной камере с неоднородным магнитным полем, осуществляется посредством теплопроводности окружающей газовой среды, тепловой и термомагнитной конвекции и лучеиспускания. При этом будет иметь место утечка тепла через токоотводы. В применяемых измерительных камерах газоанализаторов лучеиспускание и теплоотвод через токоподводы незначительно влияют на процесс теплообмена [89, 90].

Следует отметить, что изменение содержания неопределяемых компонентов (например, H_2 и CO_2) от градуировочных значений в анализируемой газовой смеси может привести к изменению показаний газоанализатора, так как теплопроводность, вязкость и другие свойства их влияют на процесс теплообмена.

Уменьшение влияния теплопроводности неопределяемых компонентов газовой смеси на показания газоанализатора может быть достигнуто путем выбора для каждого случая измерения концентрации кислорода оптимального удаления чувствительного элемента в измерительной камере от кромки полюсов магнита, что, однако, может снизить чувствительность газоанализатора по кислороду. Небольшое удаление чувствительного элемента от кромки полюсов магнита позволяет приблизить характер потока к естественной кон-

векции, что в свою очередь уменьшает влияние изменения давления газовой смеси (см. рис. 21-4-1, *а*).

Подробно процесс теплообмена в измерительных камерах, влияние различных факторов на показания термомагнитных газоанализаторов и мероприятия, уменьшающие их воздействие, рассматриваются в [90].

Следует отметить, что комплекс задач по измерению кислорода в различных условиях не может быть решен на базе одного типа термомагнитного газоанализатора с использованием одной универсальной измерительной камеры. Поэтому в зависимости от состава газовой смеси, диапазона измерения и других факторов применяют термомагнитные газоанализаторы с различными по устройству измерительными камерами, в которых направление потока термомагнитной и естественной тепловой конвекций выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к прибору.

Измерительные камеры в применяемых термомагнитных газоанализаторах в зависимости от характера конвективных потоков по отношению к чувствительному элементу выполняют с внутренней и внешней конвекцией. Газовая смесь к измерительной камере подводится прямоточным, диффузионным или прямоточным со сбросом части газа перед камерой способами.

Измерительная камера с прямоточным подводом газа применена в термомагнитном газоанализаторе типа МГК-348. В этой камере термомагнитная и тепловая конвекции взаимно перпендикулярны. Недостатком газоанализатора с такой камерой является зависимость его показаний от угла наклона камеры.

Измерительные камеры с диффузионным теплообменом широко применяются в разработанных приборах в СССР и за рубежом. При диффузионном подводе газа к камере уменьшается влияние на показание прибора изменения расхода газа. Однако при диффузионном теплообмене несколько увеличивается инерционность газоанализатора. Уменьшение транспортного запаздывания в подводящей линии осуществляется путем сброса части газа перед камерой.

Термомагнитные газоанализаторы с кольцевой измерительной камерой, с внутренней конвекцией используют одинаковую измерительную схему (рис. 21-4-2) и являются одними из первых типов термомагнитных приборов на кислород.

Измерительная камера приемного преобразователя газоанализатора выполнена в виде полого металлического кольца, по горизонтальному диаметру которого установлена тонкостенная стеклянная трубка. На этой трубке расположены два рабочих чувствительных элемента R_1 и R_2, которые нагреваются током примерно до 100° С, а в некоторых модификациях — до 200° С. Элементы R_1 и R_2 выполнены в виде спиралей из тонкой платиновой проволоки диаметром 0,04—0,05 мм. Чувствительный элемент R_1 расположен между полюсами постоянного магнита NS. Рабочие чувствительные элементы R_1 и R_2 и резисторы R_3 и R_4 из манганиновой проволоки образуют четыре плеча измерительного неравновесного моста,

В измерительную диагональ моста включен вторичный прибор *ВП* (автоматический потенциометр или милливольтметр). Питание моста осуществляется постоянным током от стабилизированного источника *ИПС*.

При протекании через кольцевую камеру преобразователя контрольного газа, не содержащего кислород, схема моста должна быть уравновешена, а указатель вторичного прибора должен находиться на начальной отметке шкалы. Незначительное отклонение от равновесия схемы в момент проверки нуля устраняется с помощью регулируемого резистора R_0.

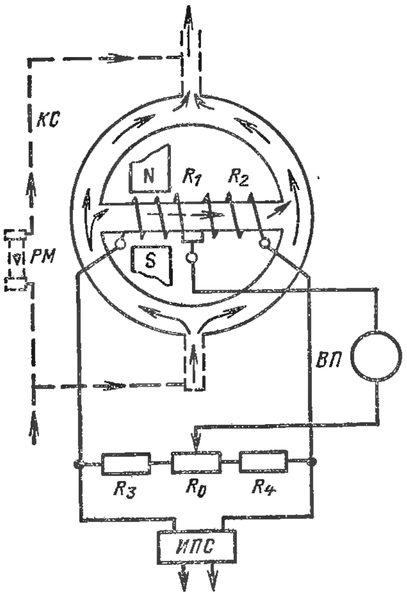


Рис. 21-4-2. Схема термомагнитного газоанализатора на O_2 с кольцевой измерительной камерой.

В рабочем режиме анализируемый газ, поступающий в измерительную кольцевую камеру через нижний канал, свободно протекает в левой и правой половине кольца и выходит через верхний канал. Если газовая смесь содержит O_2, то она втягивается в стеклянную трубку, нагревается чувствительным элементом R_1 и магнитная восприимчивость смеси уменьшается. Нагретый газ в трубке выталкивается из магнитного поля более холодным газом, протекающим в левой половине кольца, и в зоне нагретого чувствительного элемента в трубке возникает поток внутренней термомагнитной конвекции, который направлен в сторону падения напряженности магнитного поля (на рис. 21-4-2 направление потока показано пунктирной стрелкой). При этом поток термомагнитной конвекции охлаждает чувствительный элемент R_1 и часть тепла отдает чувствительному элементу R_2, который нагревается. Это приводит к уменьшению сопротивления плеча R_1 и некоторому увеличению сопротивления R_2. Изменение сопротивления рабочих чувствительных элементов R_1 и R_2 нарушает равновесие моста и вызывает изменение напряжения на вершинах измерительной диагонали моста, пропорциональное содержанию кислорода в анализируемой газовой смеси. Измерение напряжения на вершинах моста осуществляется вторичным прибором, шкала которого отградуирована в процентах по объему кислорода.

Термомагнитные газоанализаторы на O_2, выполняемые на основе рассмотренной схемы (рис. 21-4-2), изготовляются в СССР (например,

типа МГК-2 и МГК-4) и рядом зарубежных фирм. Эти приборы выпускаются обычно с диапазонами измерений 0—5, 0—10 и 0—21% O_2. Пределы допускаемой основной погрешности не превышают ±2,5% диапазона измерений.

Рассмотренные газоанализаторы чувствительны к изменениям температуры окружающего воздуха, давления и расхода газовой смеси, кроме того, их показания зависят от угла наклона кольцевой камеры. Для уменьшения влияния изменения температуры окружающего воздуха приемные преобразователи термостатируют. В некоторых случаях приборы этого типа выполняются с компенсацией по температуре и давлению. Для уменьшения транспортного запаздывания в подводящей линии предусмотрен канал *КС* для частичного сброса газа, контроль расхода газа производится с помощью ротаметра *РМ* (на рис. 21-4-2 канал и ротаметр показаны пунктиром).

Безнулевую шкалу получают, изменяя наклон стеклянной трубки путем поворота кольца по часовой стрелке. В приборе МГК-4 и приборах аналогичного типа с диапазоном измерения 80—100 или 90—100% O_2 стеклянная трубка установлена вертикально. В этом случае термомагнитная конвекция направлена вниз, а тепловая конвекция вверх. За счет тепловой конвекции нуль шкалы газоанализатора подавлен. В диапазоне измерения 80—100% O_2 чувствительность прибора возрастает, так как термомагнитная конвекция превышает тепловую. В некоторых типах газоанализаторов с кольцевой камерой наклон стеклянной трубки используется для уменьшения влияния изменения атмосферного давления.

Газоанализаторы МГК-2, МГК-4 и другие модификации приборов этого типа [75] применяются главным образом в металлургической промышленности для определения кислорода в продуктах горения, в обогащенном дутье и в других технологических газовых смесях. Термомагнитные газоанализаторы этого типа на ТЭС не применяются.

В получивших распространение на ТЭС и в промышленности термомагнитных газоанализаторах для определения O_2 в продуктах горения и в газовых смесях используется компенсационно-мостовая измерительная схема. В этих газоанализаторах применяется диффузионный способ подвода анализируемого газа в измерительную камеру приемного преобразователя. Направление термомагнитной конвекции в рабочих и сравнительных камерах совпадает с потоком тепловой конвекции. Компенсационно-мостовая измерительная схема применяется также в газоанализаторах, предназначенных для определения кислорода в воздухе, азотно-кислородной и кислородно-азотной смесях. В этих приборах поток термомагнитной конвекции перпендикулярен или направлен навстречу потоку тепловой конвекции. Газоанализаторы этих типов, разработанные СКБ аналитического приборостроения АН СССР, изготовляются серийно Выруским заводом газоанализаторов [89].

На рис. 21-4-3 приведена принципиальная схема термомагнитного газоанализатора, применяемого для определения кислорода в продуктах горения и других газовых смесях. Измерительная компенсационная схема этого прибора в принципе аналогична измерительной схеме, применяемой в рассмотренных выше термокондуктометрических газоанализаторах.

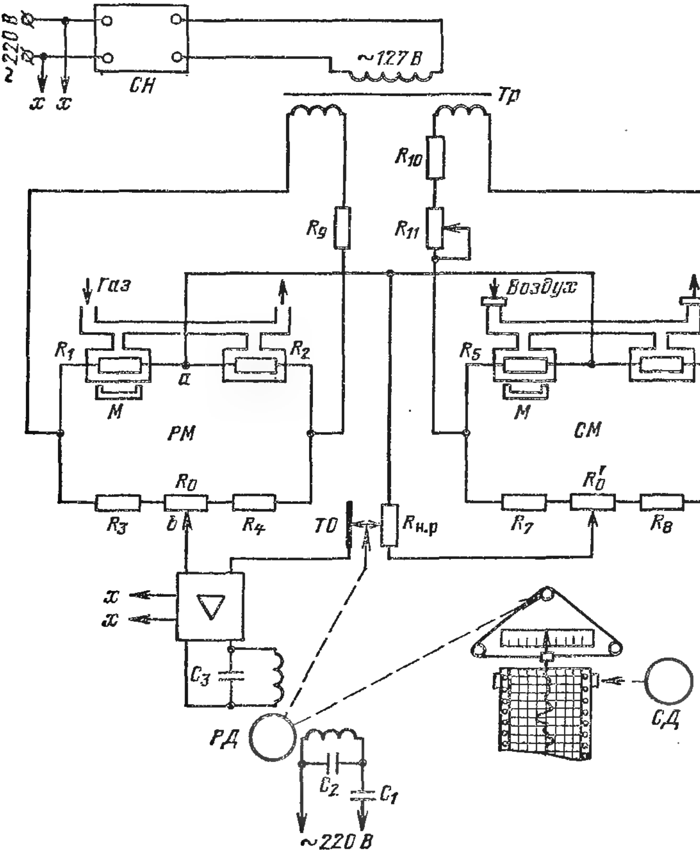


Рис. 21-4-3. Термомагнитный газоанализатор на O_2 с компенсационной мостовой измерительной схемой.

Газоанализатор включает в себя приемный преобразователь и вторичный прибор. Питание газоанализатора осуществляется от сети напряжением 127 или 220 В, частотой 50 Гц.

Приемный преобразователь газоанализатора состоит из рабочего *РМ* и сравнительного *СМ* измерительных мостов, соединенных между собой по компенсационной схеме. Мосты преобразователя питаются переменным током напряжением 24 В от двух вторичных обмоток трансформатора *Тр*, подключенного к стабилизатору *СН*.

Напряжение на зажимах мостов с помощью балластных резисторов R_9 и R_{10} устанавливается равным 10 ± 2В. Регулируемый резистор R_{11} служит для регулировки чувствительности газоанализатора. Вторичный прибор выполнен на базе автоматического уравновешенного моста МС, КСМ2 или других типов.

Реохорд вторичного прибора $R_{н.р}$ включен в измерительную диагональ сравнительного моста приемного преобразователя. К токоотводу реохорда TO и к вершине b рабочего моста подключен вход электронного усилителя.

Чувствительные элементы рабочего моста R_1 и R_2, находящиеся в измерительных камерах, омываются анализируемым газом. Чувствительные элементы сравнительного моста R_5 и R_6, размещенные в камерах, омываются воздухом, поступающим через фильтры. Чувствительные элементы R_1 и R_5 расположены в неоднородном магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами M. Чувствительные элементы R_1, R_2, R_5 и R_6 изготовлены из платиновой проволоки диаметром 0,02 мм в виде спиралей, вплавленных в стеклянные капилляры, и снабжены токоподводами. Остальные плечи мостов преобразователя R_3, R_4, R_7 и R_8 выполнены из манганиновой проволоки. Для уменьшения температурной погрешности измерительной схемы преобразователя последовательно с плечами мостов R_3, R_4, R_7 и R_8 включают термокомпенсирующие резисторы, выполненные из медного провода на латунном каркасе. Эти резисторы на рис. 21-4-3 не показаны.

Регулировка нуля газоанализатора в процессе эксплуатации осуществляется резистором R_0. Во время поверки и регулировки нуля прибора постоянный магнит должен быть зашунтирован магнитным шунтом, выполненным в виде массивной скобки из стали «армко». При опущенном магнитном шунте до упора на наконечники магнита указатель каретки должен установиться на красной черте в начале шкалы. Отклонение указателя от этой отметки не должно превышать предела допускаемой основной погрешности прибора. Магнитный шунт на схеме не показан. Резистор R_0' служит для установки нуля прибора при наладке газоанализатора на заводе-изготовителе.

При равновесии измерительной схемы преобразователя напряжение на вершинах рабочего моста ab уравновешивается падением напряжения на части реохорда выше движка. Условию равновесия измерительной схемы отвечает выражение

$$U_{ab} = mU_{р},$$

где m — отношение длины участка реохорда выше движка к полной его рабочей длине; $U_{р}$ — падение напряжения на рабочей длине реохорда.

При изменении концентрации кислорода в анализируемом газе напряжение на вершинах рабочего моста вследствие изменения интенсивности термомагнитной конвекции в левой его камере изменится и на входе усилителя появится напряжение небаланса $\Delta U =$

$= U_{ab} - U_р$, которое усиливается усилителем до размера, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя. Выходной вал реверсивного двигателя через систему кинематической передачи воздействует на движок реохорда, изменяя компенсирующее напряжение $mU_р$ до тех пор, пока оно не уравновесит изменившееся напряжение на вершинах рабочего моста U_{ab}. Одновременно вал реверсивного двигателя перемещает в соответствующее положение каретку с указателем и пером, фиксируя новое значение концентрации кислорода в анализируемом газе.

В реальной измерительной схеме приемного преобразователя имеются вспомогательные резисторы и два резистора для компенсации сопротивления нерабочего участка реохорда вторичного прибора. Кроме того, в измерительной схеме предусмотрен тумблер, который имеет два положения «измерение» и «контроль». При включении тумблера в положение «контроль» производится контроль чувствительности газоанализатора при одновременном пропускании воздуха через измерительные камеры рабочего моста. При нормальной чувствительности указатель каретки вторичного прибора (при определенном расходе воздуха и разрежении в рабочем канале преобразователя) должен установиться на красной черте в конце шкалы. Отклонение от красной черты не должно превышать одного деления. Если указатель не установится на указанную отметку, то регулировка чувствительности осуществляется с помощью реостата R_{11}.

Для подгонки сопротивления проводов, соединяющих приемный преобразователь с реохордом вторичного прибора, служат две катушки из манганинового провода с сопротивлением по 2,5 Ом. Суммарное сопротивление каждого провода и катушки должно быть доведено до 2,5 ± 0,05 Ом.

Рассмотренная принципиальная измерительная схема термомагнитного газоанализатора используется в приборах типа МН5106 и МН5130, предназначенных для определения O_2 в продуктах горения и газовых смесях, содержащих кроме кислорода N_2, Ar, CO, CO_2, H_2 и CH_4.

Рассмотрим газовую схему газоанализатора типа МН5106, показанную на рис. 21-4-4. Анализируемый газ из отборного устройства поступает в блок очистки, в котором последовательно проходит через холодильник *1* по трубке *2*, фильтр *3* для очистки его от сернистого газа, вторично через холодильник по спиральной трубке *4*, а далее через фильтр тонкой очистки *5*. В фильтре для очистки пробы газа от сернистого газа находятся стальная стружка и некоторый объем воды, через который газ барботирует. Вода в этот фильтр поступает в виде конденсата, образующегося при охлаждении пробы газа в трубках холодильника. Излишек воды из фильтра вытекает через трубку в сливной сосуд *6*, который образует одновременно и водяной затвор. Для контроля расхода анализируемого газа и давления в подводящей линии перед приемным преобразователем установлен ротаметр — индикатор расхода *7*, а за преобразо-

вателем — жидкостный манометр *8*. Регулировка расхода пробы газа и давления производится редукционными вентилями *9* и *10*. Побудителем расхода служит водоструйный эжектор (насос) *11*, установленный на выходе пробы газа. Измерительные камеры сравнительного моста преобразователя сообщаются с атмосферой через фильтры *12*, которые предохраняют камеры от попадания пыли.

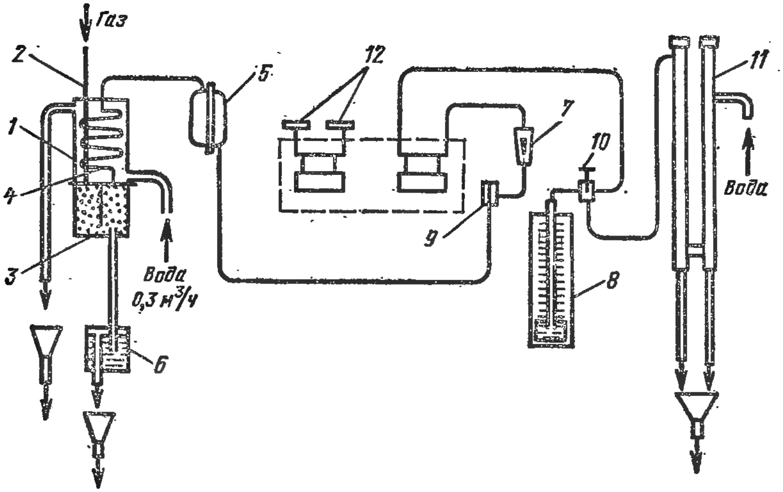


Рис. 21-4-4. Газовая схема термомагнитного газоанализатора на O_2 типа МН5106.

Газоанализаторы типа МН5106 имеют шкалу 0—10% по объему O_2. Пределы допускаемой основной погрешности ±0,25% O_2. Газоанализаторы типа МН5130 выпускаются со следующими шкалами: 0—0,5; 0—1; 0—2; 0—5; 0—10; 0—21; 0—50; 20—80; 50—100 и 80—100% по объему O_2. Пределы допускаемой основной погрешности шкалы 0—0,5% O_2 — ±10%; для шкал 0—1 и 0—2% O_2 — ±5%; для шкал от 0—5 до 50—100% O_2 — ±2% и для шкалы 80—100% O_2 — ±2,5% диапазона измерения.

Данные об изменении показаний газоанализаторов при отклонении влияющих величин от нормальных значений приводятся в заводской инструкции по монтажу и эксплуатации приборов.

Время установления теплового равновесия (прогрева) газоанализатора не превышает 1 ч, а для прибора МН5130 со шкалой 80—100% O_2 — 2 ч. Время установления постоянных показаний прибора при изменении концентрации кислорода на входном штуцере приемного преобразователя не превышает 1,5 мин для прибора МН5106, а для газоанализатора МН5130 со шкалами от 0—5 до 0—50% O_2 — 0,5 мин и 1 мин с остальными шкалами.

С другими типами выпускаемых магнитных газоанализаторов можно познакомиться в [75].

21-5. Оптические газоанализаторы

Общие сведения. Оптические газоанализаторы основаны на использовании зависимости изменения того или иного оптического свойства анализируемой газовой смеси от изменения концентрации измеряемого компонента. В оптических газоанализаторах исполь-

вуются такие оптические свойства, как спектральное поглощение, оптическая плотность, показатель преломления, спектральное излучение газовой смеси и др.

В соответствии с оптическим свойством, положенным в основу принципа работы прибора, оптические газоанализаторы подразделяются на следующие основные три группы (ГОСТ 13320-67):

1. Абсорбционные — основанные на поглощении лучистой энергии в инфракрасной области спектра (в том числе оптико-акустические), ультрафиолетовой и видимой областях спектра (фотоколориметрические жидкостные и ленточные).

2. Интерферометрические — основанные на использовании явления смещения интерференционных полос вследствие изменения оптической плотности газовой среды на пути одного из двух когерентных лучей.

3. Эмиссионные — основанные на излучении лучистой энергии, например на измерении интенсивности спектральных линий излучения компонента, зависящей от его концентрации в анализируемой газовой смеси. Этот метод, предложенный С. Эфришем, принято называть методом эмиссионного спектрального анализа газовой смеси.

Газоанализаторы, основанные на поглощении инфракрасных лучей, получили широкое применение в различных отраслях промышленности и применяются для определения концентрации окиси углерода (CO), двуокиси углерода (CO_2), метана (CH_4), аммиака (NH_3) в сложных газовых смесях, а также и других газов. Это объясняется тем, что в инфракрасной области спектра газы имеют весьма интенсивные и отличительные друг от друга по положению в спектре полосы поглощения.

Газоанализаторы, основанные на поглощении ультрафиолетовых лучей, применяются в химической, нефтяной и пищевой промышленности. Благодаря высокой чувствительности они широко используются для определения токсических и взрывоопасных концентраций различных газов в воздухе промышленных предприятий. Газоанализаторы этого типа позволяют определять содержание паров ртути, хлора и других газов и паров как в воздушной среде, так и в технологических газовых смесях.

Газоанализаторы фотоколориметрические, основанные на поглощении лучей в видимой области спектра, подразделяются на жидкостные и ленточные. Жидкостные газоанализаторы являются приборами с непосредственным (прямым) поглощением излучения определяемым компонентом при взаимодействии анализируемого компонента с жидким реактивом. В газоанализаторах второго типа измеряется светопоглощение поверхностью бумажной или текстильной ленты, предварительно пропитанной или смоченной соответствующим реактивом. Фотоколориметрические газоанализаторы широко применяют для измерения микроконцентрации различных газов в воздушной среде и в сложных газовых смесях. Эти газоанализаторы широко используются также для определения в воздухе

промышленных предприятий токсической концентрации различных газов и паров, вредных для человека. Фотоколориметрические газоанализаторы для определения больших концентраций не применяются. Следует отметить, что фотоколориметрический метод находит широкое применение для анализа жидкостей, в частности для анализа воды на ТЭС.

Спектрофотометрические газоанализаторы, основанные на методе эмиссионного спектрального анализа газовой смеси, используются для анализа аргона, гелия, азота, водорода и кислорода на примеси.

Газоанализаторы, основанные на поглощении инфракрасных лучей (оптико-акустические). Известно, что способностью поглощать инфракрасные лучи обладают все газы, которые содержат в молекуле два и более различных атомов, например окись углерода (CO), двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4). Способность к поглощению инфракрасных лучей не проявляется у таких газов, как кислород (O_2), азот (N_2), водород (H_2), одноатомные газы — гелий (He), неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr), ксенон (Xe), радон (Rn), которые имеют один тип атомов.

Основным законом, определяющим интенсивность монохроматического излучения, прошедшего известную толщину поглощающего слоя газа x, является закон Ламберта—Бера

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-kcx}, \tag{21-5-1}$$

где $I_{0\lambda}$, I_λ — интенсивность монохроматического излучения до и после прохождения поглощающего слоя газа; k — коэффициент поглощения, характерный для данного газа и определенной длины волны λ; c — объемная концентрация газа, поглощающего излучение (в долях единицы).

Известно, что каждый газ поглощает инфракрасное излучение в свойственных ему участках спектра. Это различие спектров поглощения в инфракрасной области в большинстве случаев позволяет вести избирательный анализ данного компонента в сложной газовой смеси при переменной концентрации неопределяемых компонентов.

В зависимости от принципа действия лучеприемника газоанализатора, а вместе с тем и характера реакции его на поток инфракрасного излучения (селективного и неселективного) существующие газоанализаторы этого типа делятся на несколько групп и имеют различные наименования. Наибольшее распространение имеют газоанализаторы, в которых используется селективный оптико-акустический лучеприемник.

На рис. 21-5-1, *а* схематично показан оптико-акустический лучеприемник *1*, в котором находится газ, способный поглощать инфракрасные лучи. Окно *2* этого лучеприемника выполнено из материала, пропускающего инфракрасное излучение. Через это окно поступает поток инфракрасного излучения от источника *3*, прерываемый с определенной частотой обтюратором *4*, приводимым в действие

синхронным двигателем 5. Вследствие этого газ будет периодически нагреваться за счет поглощения энергии и охлаждаться и в замкнутом объеме лучеприемника возникнут периодические колебания температуры, вызывающие периодические колебания давления газа

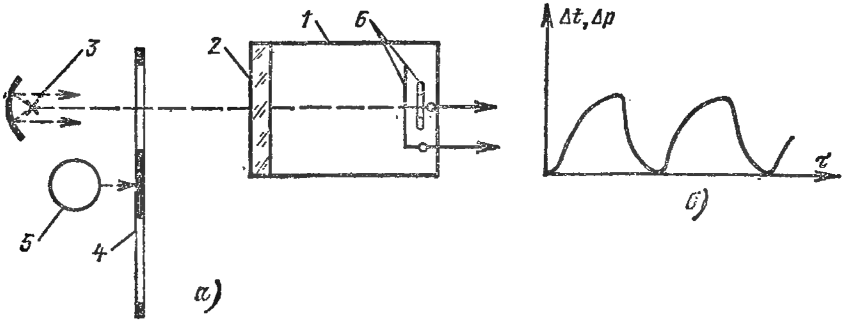


Рис. 21-5-1. Схема оптико-акустического лучеприемника.

(рис. 21-5-1, *б*). Колебания давления могут быть преобразованы конденсаторным микрофоном 6 в электрический выходной сигнал, который можно измерить. Описанное оптико-акустическое явление известно как явление Тиндаля—Рентгена, которое ими наблюдалось при звуковых частотах модуляции излучения.

Рассмотренный лучеприемник, заполненный данным газом, является селективным (избирательным), так как процесс поглощения модулированного инфракрасного излучения и связанные с ним периодические колебания температуры и давления возникают только при определенных длинах волн, соответствующих спектру поглощения газа, находящегося в лучеприемнике (рис. 21-5-2).

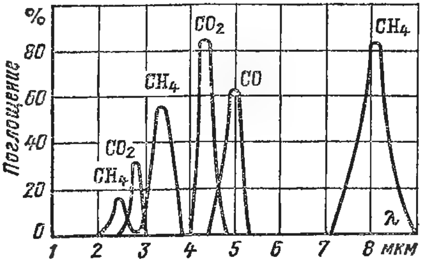


Рис. 21-5-2. Спектры поглощения CO, CO_2 и CH_4 в инфракрасной области.

Предположим, что перед оптико-акустическим лучеприемником установлена дополнительная (рабочая) камера с двумя окнами из материала, пропускающего инфракрасное излучение. Если через эту камеру пропускать газовую смесь, содержащую также и анализируемый газ, которым наполнен лучеприемник, то при прохождении потока инфракрасного излучения часть его поглотится газом, находящимся в рабочей камере. Поэтому в лучеприемник будет поступать ослабленный поток излучения, степень ослабления которого будет зависеть от концентрации определяемого компонента в газовой смеси. Это приводит к изменению амплитуды коле-

баний температуры и давления в замкнутом объеме лучеприемника. Таким образом, амплитуда будет определять концентрацию определяемого компонента в газовой смеси, пропускаемой через рабочую камеру.

Необходимо отметить, что наличие в анализируемой сложной газовой смеси неопределяемых компонентов, спектры поглощения которых могут частично перекрывать спектр поглощения определяемого компонента (например, наличие CO и CH_4 при определении CO_2 в газовой смеси), приведет к увеличению погрешности измерения. Это обусловливается тем, что в данном случае степень ослабления потока инфракрасного излучения в рабочей камере будет определяться и концентрацией мешающих неопределяемых компонентов. Значение погрешности измерения будет зависеть от соотношения удельных коэффициентов (показателей) поглощения определяемого и неопределяемого компонентов, от выбранной схемы и конструкции газоанализатора, а также от концентрации неопределяемого мешающего компонента. Для уменьшения влияния неопределяемых компонентов на точность измерения в оптическом канале газоанализатора устанавливают фильтровую камеру, наполняемую неопределяемыми мешающими компонентами в смеси с газом, не поглощающим инфракрасное излучение в требуемой пропорции.

Рассмотренная одноканальная оптическая схема газоанализатора, состоящая из источника инфракрасного излучения, обтюратора, рабочей камеры и лучеприемника, не может обеспечить необходимую точность измерения. Для повышения точности измерения в большинстве отечественных и зарубежных газоанализаторов применяют двухканальную (дифференциальную) оптическую схему.

Первые типы газоанализаторов, использующие оптико-акустическое явление Тиндаля—Рентгена, были созданы в СССР М. Л. Вейнгеровым. Они работали на звуковых частотах модуляции инфракрасного излучения и поэтому получили наименование оптико-акустических газоанализаторов. Выпускаемые же в настоящее время газоанализаторы этого типа работают с частотой модуляции 5—6 Гц, но наименование их осталось прежним.

Рассмотрим принципиальную схему оптико-акустического газоанализатора с газовой компенсацией, показанную на рис. 21-5-3, широко применяемого для определения CO (тип ОА2109), CO_2 (тип ОА2209) и CH_4 (тип ОА2309) в сложных газовых смесях. Газоанализатор состоит из приемного преобразователя *1* и вторичного прибора *2*, выполненного на базе автоматического уравновешенного моста типа МС (МСР) или КСМ2. Приемный преобразователь состоит из следующих элементов и узлов: *3* — излучателя из нихромовой проволоки; *4* — отражателя; *5* — обтюратора; *6* — синхронного двигателя, приводящего в действие обтюратор; *7* — фильтровых камер, заполненных неопределяемыми мешающими компонентами в смеси с газом, не поглощающим инфракрасное излучение в требуемой пропорции; *8* — рабочей камеры, через ко-

торую протекает анализируемая газовая смесь; *9* — отражающей пластины; *10* — лучеприемника; *11* — лучеприемных камер, заполненных анализируемым компонентом или газовой смесью, содержащей измеряемый компонент и газ, не поглощающий инфракрасное излучение в определенной пропорции в зависимости от диапазона измерений; *12* — конденсаторного микрофона, предназначенного для преобразования колебания давления в лучеприемнике в электрический выходной сигнал; *13* — компенсационной камеры, заполненной газовой смесью, содержащей измеряемый компонент и газ, не поглощающий инфракрасное излучение в определенной пропорции в зависимости от диапазона измерений; *14* — поршня для изменения толщины поглощающего слоя газа (передняя плоскость поршня одновременно выполняет функции отражателя); *15* — усилителя со вспомогательным блоком питания; *16* — реверсивного двигателя, вал которого через редуктор может перемещать поршень; *17* — реохорда, включенного в мостовую измерительную схему вторичного прибора. Окна фильтровых, рабочей, компенсационной и лучеприемных камер выполнены из синтетического корунда, пропускающего инфракрасное излучение. Для герметизации компенсационной камеры применен сильфон.

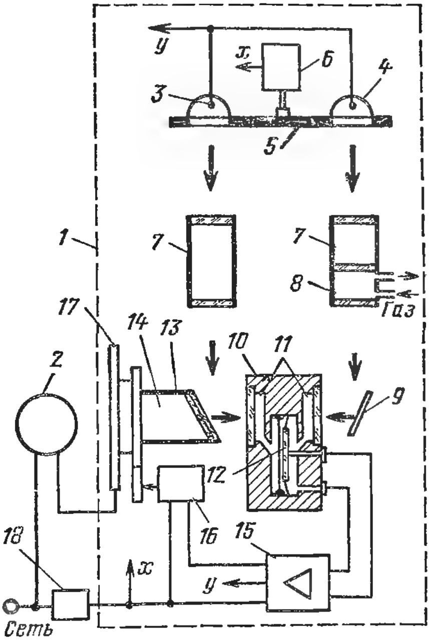


Рис. 21-5-3. Принципиальная схема оптико-акустического газоанализатора с газовой компенсацией.

Питание электрической схемы приемного преобразователя газоанализатора осуществляется от сети напряжением 127 или 220 В, частотой 50 Гц через стабилизатор *18*.

Потоки инфракрасного излучения (показаны стрелками на рис. 21-5-3) от двух излучателей, одновременно прерываемые обтюратором, поступают в два оптических канала. В правом канале поток излучения проходит через фильтровую и рабочую камеры и ослабляется в фильтровой камере, а затем в рабочей пропорционально концентрации определяемого компонента в анализируемой газовой смеси. Ослабленный поток излучения поступает через отражатель в правую лучеприемную камеру. В левом сравнительном канале поток излучения проходит через фильтровую и компенса-

ционную камеры и, отражаясь в последней от передней плоскости поршня, поступает в левую лучеприемную камеру. В этом канале инфракрасное излучение ослабляется в фильтровой камере (на то же значение, что и в фильтровой камере правого канала), а затем в компенсационной камере пропорционально толщине слоя газа в ней.

При равенстве интенсивностей инфракрасного излучения в правой и левой лучеприемных камерах мембрана конденсаторного микрофона остается неподвижной. Периодическое нагревание и охлаждение газа хотя и вызывают в левой и правой лучеприемных камерах колебания давлений, но они возникают одновременно с обеих сторон мембраны и равны по амплитуде. Поэтому выходной сигнал конденсаторного микрофона практически равен нулю.

Если интенсивность поступающего инфракрасного излучения в правую лучеприемную камеру будет меньше, чем в левую, то и амплитуда периодического колебания давлений в правой лучеприемной камере будет меньше, чем в левой. При этом разность давлений, действующая на мембрану конденсаторного микрофона, будет тем больше, чем больше будет концентрация определяемого компонента в анализируемой газовой смеси. Амплитуда колебаний мембраны и связанное с ней изменение выходного сигнала пропорциональны разности давлений в лучеприемных камерах, а следовательно, и концентрации определяемого компонента в газовой смеси.

Выходной сигнал конденсаторного микрофона, пропорциональный амплитуде колебаний его мембраны, подается на вход усилителя. Вал реверсивного двигателя, управляемого усилителем, через редуктор и преобразовательное устройство перемещает поршень компенсационной камеры, заполненной определяемым компонентом, и изменяет тем самым толщину слоя газа в ней до тех пор, пока интенсивность поступающего инфракрасного излучения в левую лучеприемную камеру не будет равна интенсивности излучения, поступающего в правую лучеприемную камеру.

Положение поршня при его перемещении, а следовательно, и толщину слоя газа можно определить по вспомогательной шкале, нанесенной на вращающийся циферблат, жестко соединенный с каркасом реохорда (шкала на рис. 21-5-3 не показана). Таким образом, в пределах диапазона измерения прибора каждому значению концентрации определяемого компонента в анализируемой газовой смеси соответствует определенная толщина слоя этого же компонента в компенсационной камере, а вместе с тем и сопротивление рабочего участка реохорда, измеряемое вторичным прибором.

В рассмотренном газоанализаторе с газовой компенсацией поглощение инфракрасного излучения в обоих оптических каналах имеет одинаковый спектрально-избирательный характер. Приборы с газовой компенсацией по сравнению с оптико-акустическими газоанализаторами с электрической и оптической компенсацией обла-

дают более высокой чувствительностью, равномерной шкалой и лучшими метрологическими характеристиками [89].

Пределы допускаемой основной погрешности газоанализаторов ОА2109, ОА2209 и ОА2309 составляют ±2,5% диапазона измерения.

21-6. Газовые хроматографы

Общие сведения. Газовые хроматографы, предназначенные для количественного анализа газовых смесей, широко используются в качестве лабораторных приборов в различных отраслях промышленности (химической, газовой, нефтехимической, энергетической и др.). В последние годы у нас и за рубежом уделяют большое внимание созданию промышленных газовых хроматографов. Применение этих приборов в химической и нефтехимической промышленности для контроля и автоматизации технологических процессов позволило улучшить сортность продукции и достигнуть большей экономической эффективности [91].

В энергетике хроматографы лабораторного типа применяют для периодического анализа продуктов горения различных видов топлива, при проведении исследований процесса горения в топочных устройствах и испытаний парогенераторов; хроматографы с дополнительным устройством используются для определения количества водорода, растворенного в воде и паре, а также влажности водорода в системах охлаждения обмоток турбогенераторов.

Хроматографы используются для периодического анализа продуктов горения различных видов топлива в промышленных парогенераторах, печах и других установках. Кроме того, хроматографы могут быть использованы для определения концентрации вредных примесей (CO, CH_4 и др.) в воздухе производственных помещений. Здесь хроматография используется для разделения газовых смесей физическими методами, основанными на распределении одного или нескольких компонентов смеси между двумя фазами. Одна из этих фаз, фиксированная на адсорбенте (поверхности твердого тела или тонкого слоя жидкости), омывается подвижной фазой (газом-носителем вместе с анализируемым газом), движущейся в свободном пространстве, не занятом неподвижной фазой. При этом происходит многократное повторение элементарных актов адсорбции и десорбции. Так как отдельные компоненты газовой смеси поглощаются и удерживаются данным адсорбентом неодинаково, то распределение компонентов между двумя фазами, а вместе с тем и перемещение их относительно друг друга осуществляется в определенной последовательности со скоростью, характерной для каждого компонента. Это позволяет производить поочередное определение концентрации каждого компонента газовой смеси.

Метод хроматографического разделения веществ при помощи адсорбентов впервые был открыт в 1903 г. русским ученым М. С. Цветом и применен им при исследовании пигментов, участвующих в фото-

синтезе растений. При проведении исследований М. С. Цвет имел дело с окрашенными веществами и поэтому используемый им метод разделения он назвал хроматографией (chromatos — цвет). В настоящее же время хроматографические методы применяются для разделения и бесцветных веществ, но наименование методов осталось прежним.

Газовая хроматография как метод качественного и количественного анализа различных веществ получила широкую известность в последние годы. Развитию газовой хроматографии в большой степени способствовал предложенный в 1952 г. А. Мартином и А. Джеймсом метод газожидкостной хроматографии.

Хроматография газов подразделяется на газоадсорбционную и газожидкостную.

Газоадсорбционный метод разделения компонентов газовой смеси основан на различной адсорбируемости компонентов твердыми адсорбентами, представляющими собой пористые вещества с большой поверхностью. Адсорбентами, широко применяемыми в газоадсорбционной хроматографии являются активированные угли, силикагели, алюмогели, молекулярные сита (цеолиты). Используются также и другие адсорбенты, например тонкопористые стекла [92].

В газожидкостной хроматографии разделение сложных смесей веществ основано на различии растворимости компонентов анализируемой смеси в тонком слое жидкости, нанесенной на поверхности твердого химически инертного носителя. Твердый носитель не участвует непосредственно в адсорбционном процессе, а служит только для создания необходимой поверхности растворителя. Выбор жидкости (неподвижной фазы) определяется природой подлежащих разделению смеси веществ. Для разделения веществ применяют различные жидкости, например вазелиновое масло (смесь жидких парафинов высокой чистоты), силиконовое масло (ДС-200, ДС-703) высококипящее авиационное масло, полиэтиленгликоль различных марок и др. Подробные сведения о применяемых жидкостях в газожидкостной хроматографии и температурном режиме анализа приведены в [93]. В качестве твердых нейтральных носителей используется кирпич (инзенский — ИНЗ-600, дмитровский, апрелевский) диатомит, каолин и др.

Разновидностью газожидкостной хроматографии является капиллярная газовая хроматография, предложенная в 1957 г. М. Голеем. В капиллярной хроматографии в качестве твердого носителя неподвижной фазы применяют длинные капиллярные трубки, внутреннюю поверхность которых покрывают тонким равномерным слоем нелетучей жидкости. Капиллярная хроматография обеспечивает более четкое разделение компонентов газовой смеси. Кроме того, процесс анализа требует меньше времени. Капиллярные колонки, обладающие рядом преимуществ, имеют и ряд существенных недостатков, поэтому область их применения ограничена.

За последнее время метод газоадсорбционной хроматографии осуществляется также и на капиллярных трубках (колонках),

имеющих на внутренней стенке пористый слой или заполненных активным адсорбентом [92].

Следует отметить, что в газовой хроматографии в последнее время начинают применять модифицированные адсорбенты [92]. В этом случае подвижной фазой является газ, а неподвижной — твердый адсорбент, модифицированный небольшим количеством жидкости. При применении такого адсорбента разделение компонентов газовой смеси происходит как за счет адсорбции на твердом носителе, так и за счет растворимости в жидкости. Здесь одновременно используются газоадсорбционный и газожидкостный методы.

Хроматографический процесс может быть осуществлен одним из следующих методов: проявительным, фронтальным или вытеснительным. В проявительном методе газоадсорбционной и газожидкостной хроматографии вдоль слоя адсорбента непрерывно протекает несорбирующийся газ-носитель, в поток периодически вводят дозу анализируемой газовой смеси. Этот метод получил широкое применение для аналитических целей. Методы фронтальный и вытеснительный не нашли широкого применения для аналитических целей и ниже рассматриваться не будут.

Кроме указанных методов осуществления хроматографического процесса применяют метод проявительного анализа с программированным повышением температуры по всей длине разделительной колонки. Для анализа микропримесей в инертных по отношению к адсорбенту газах может быть использован термодинамический метод, разработанный А. А. Жуховицким и Н. М. Туркельтаубом.

В газовой хроматографии в качестве газа-носителя обычно используются гелий, аргон, водород, азот, воздух и другие газы.

Проявительную газоадсорбционную хроматографию широко применяют в энергетике и других отраслях промышленности для разделения смесей низкокипящих веществ, входящих в состав продуктов горения (H_2, O_2, CO, CH_4, N_2 и др.); метод газожидкостной хроматографии не обеспечивает хорошего разделения этих веществ из-за их слабой растворимости в жидкой фазе. В последнее время газоадсорбционный метод используется также и для анализа высококипящих веществ и легких углеводородных газов [92].

Газожидкостная хроматография находит применение для разделения высококипящих веществ, к которым относятся большинство углеводородов. Хроматографические методы позволяют производить анализ газовых смесей, жидких веществ, а также твердых, о растворенных в жидкости веществ. В последнем случае разделительная колонка хроматографа снабжается устройством для испаения анализируемой жидкости.

Описываемые ниже основные элементы газоадсорбционных хроматографов и методика проведения анализа применимы также и к проявительной газожидкостной хроматографии.

Схема устройства газового хроматографа и его основные элементы. На рис. 21-6-1 показана упрощенная схема хроматографа, иллюстрирующая проявительный газоадсорбционный метод ана-

лиза газовой смеси. На схеме приняты следующие обозначения: *ГН* — газ-носитель, подаваемый из баллона; *1* — фильтр-осушитель; *2* — устройство для введения анализируемой пробы газа; x_1, x_2, x_3 — определяемые компоненты анализируемой пробы газа; *3* — разделительная колонка; *4* — детектор (измерительный преобразователь с электрическим выходным сигналом); *5* — автоматический показывающий и самопишущий микровольтметр; *6* — ротаметр для контроля постоянства расхода газа-носителя, протекающего через разделительную колонку.

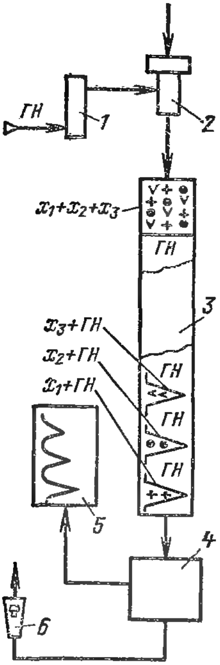


Рис. 21-6-1. Упрощенная схема хроматографа.

Газ-носитель (например, воздух) непрерывно протекает с постоянной скоростью через разделительную колонку, заполненную соответствующим адсорбентом (например, активизированным углем), и детектор. При установившемся режиме через дозировочное отверстие с помощью шприца вводится проба анализируемого газа. Дозировочное отверстие в устройстве для введения пробы газа закрыто самоуплотняющей резиновой мембраной. Поэтому при прокалывании иглой шприца мембраны герметичность газовой линии и разделительной колонки не нарушается. Для введения пробы газа в разделительную колонку применяют также и другие устройства, например специальные краны-дозаторы.

Для большей наглядности предположим, что проба газа состоит только из трех горючих компонентов — x_1, x_2 и x_3 (например, H_2, CO и CH_4). Эти компоненты, имеющие различные физико-химические свойства, обладают неодинаковой адсорбционной способностью, что и обусловливает различие в скоростях их перемещения через разделительную колонку. На начальном участке разделительной колонки зоны, занятые компонентами x_1, x_2 и x_3 в потоке газа-носителя, взаимно перекрываются. При дальнейшем их продвижении через слой адсорбента разделительной колонки процесс заканчивается полным разделением компонентов. При этом каждый компонент образует перемещающийся концентрационный профиль, представляющий собой колоколообразную кривую, которая с достаточным приближением может быть описана гауссовским законом распределения. Профили каждого компонента, разобщенные между собой зонами чистого газа-носителя *ГН*, представляют собой бинарные смеси $x_1 + ГН$, $x_2 + ГН$ и $x_3 + ГН$.

В начальный момент времени после введения пробы из разделительной колонки выходит чистый газ-носитель. Первым покидает колонку компонент x_1 H_2), обладающий наименьшей адсорбционной способностью, за ним — x_2 (CO) и последним — газ x_3 (CH_4), наиболее хорошо адсорбирующийся данным адсорбентом.

Концентрационный профиль каждого компонента при выходе его из разделительной колонки преобразуется, например, термохимическим детектором (измерительным преобразователем) в электрический выходной сигнал в виде функции времени и представляет собой хроматографический пик.

Выходные сигналы преобразователя, соответствующие чистому газу-носителю и компонентам x_1 (H_2), x_2 (CO) и x_3 (CH_4), подаются на вход самопишущего микровольтметра и записываются в виде хроматограммы (рис. 21-6-2). На хроматограмме выходные сигналы детектора, отражающие профиль каждого из компонентов x_1, x_2 и x_3, фиксируются в виде пиков, расположенных на начальной (нулевой) линии ленты прибора, представляющей собой запись нулевого выходного сигнала преобразователя во время выхода из колонки чистого газа-носителя.

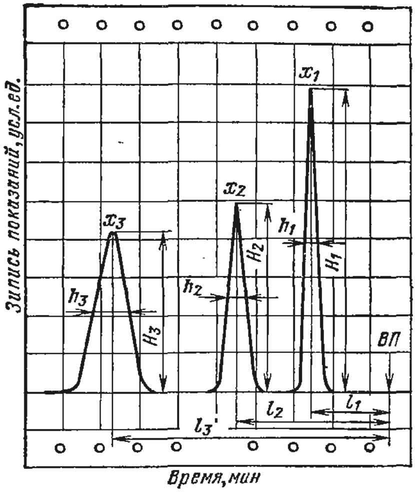


Рис. 21-6-2. Примерная хроматограмма разделения смеси трех компонентов — x_1, x_2 и x_3.

Хроматограмма (рис. 21-6-2) дает представление о качественном и количественном составе анализируемой газовой смеси. Время выхода каждого компонента из разделительной колонки характеризует их природу, а площадь или высота пика H определяет количественный состав смеси. На хроматограмме расстояния l_1, l_2 и l_3 от момента ввода пробы (*ВП*) до максимума пиков, выраженные в минутах или кубических сантиметрах, характеризуют время или объем удержания. При заданных условиях анализа каждому компоненту анализируемой смеси соответствует свое определенное время удержания. Характерным параметром хроматографического пика для каждого компонента пробы является также ширина пика h на половине высоты H.

При выполнении количественного анализа зависимость площади или высоты пика от концентрации данного компонента и время выхода отдельных компонентов устанавливаются при проведении предварительной калибровки хроматографа, выполняемой по контрольным смесям или по чистым газам.

Основными элементами и устройствами газового хроматографа являются разделительная колонка, обеспечивающая процесс разделения анализируемой газовой смеси, детектор — приемный измерительный преобразователь, самопишущий прибор и дозатор. Если разделительная колонка работает при повышенных темпера-

турах, то хроматограф снабжается термостатирующими устройствами.

Для изготовления колонок используют трубки с внутренним диаметром 3—8 мм. Материал трубок должен быть химически стойким при отсутствии каталитической активности по отношению к компонентам анализируемой смеси и адсорбенту. Широкое применение находят трубки из боросиликатного стекла, нержавеющей стали, меди, фторопласта и других материалов. Металлическим трубкам отдают предпочтение для изготовления колонок, работающих при повышенных температурах. Трубки из фторопласта применяют для разделительных колонок, когда анализ проводится при температуре, близкой к 20—30° С.

Разделительные колонки по форме изготовляют прямые, U-образные, W-образные, спиральные и в виде незамкнутого кольца. Длина колонок выполняется различной — от 0,5 м до нескольких метров (за исключением капиллярных колонок) в зависимости от состава анализируемой смеси. Изменяя длину колонки, можно влиять на разделительную способность ее. Оптимальную длину колонки находят обычно опытным путем. В некоторых случаях разделительную колонку выполняют из двух частей с промежуточным дополнительным дозатором [94].

Детектор, присоединяемый к выходу разделительной колонки, является весьма ответственным элементом хроматографа. Применяемые детекторы хроматографов основаны на использовании какого-либо физического или физико-химического свойства бинарной смеси газа-носителя и отделенного от анализируемого газа компонента. Тип детектора и его характеристики однозначно определяют возможность хроматографической установки, время, необходимое для проведения анализа, оптимальный объем пробы, режим анализа и др.

Детектор должен обладать малой инерционностью, высоким порогом чувствительности, стабильностью метрологических характеристик и линейной зависимостью выходного сигнала от концентрации определяемых компонентов. Детекторы в зависимости от метода измерения компонента, выделяющегося из смеси, подразделяются на интегральные и дифференциальные.

Интегральные детекторы измеряют суммарное количество компонента, выделяющегося из анализируемой смеси. К их числу относятся детекторы, действие которых основано на титровании или на непосредственном измерении объема, отделяемого от анализируемой смеси и газа-носителя компонента.

Дифференциальные детекторы, фиксирующие изменение тех или иных физических или физико-химических свойств бинарной смеси, разделяют на две группы: концентрационные и потоковые. Детекторы первой группы (например, термокондуктометрические и плотности) измеряют концентрацию, а второй — произведение концентрации на скорость, т. е. количество протекающего вещества (например, пламенно-ионизационные детекторы). Такое деление диф-

ференциальных детекторов условно, так как в зависимости от скорости газа-носителя любой из них практически может работать на обоих режимах. Тот или иной режим работы детектора выбирают в зависимости от целесообразности его использования в различных схемах. При этом необходимо иметь в виду, что при использовании концентрационного детектора при изменении скорости газа-носителя меняется площадь пика, но высота его не изменяется, а для потокового детектора, наоборот, с изменением скорости газового потока площадь пика сохраняется постоянной, а высота его изменяется. В выпускаемых в настоящее время хроматографах используются в основном дифференциальные детекторы.

Из числа описанных в литературе дифференциальных детекторов наибольшее распространение получили термокондуктометрические (по теплопроводности газовой смеси), термохимические (по полезному тепловому эффекту каталитического сжигания), детекторы плотности, пламенно-ионизационные и др.

Термокондуктометрические и термохимические детекторы широко используются в газовых хроматографах, применяемых для анализа продуктов горения, газообразного топлива и других газовых смесей. Действие этих детекторов аналогично действию описанных выше приемных измерительных преобразователей тепловых газоанализаторов, принципиальные измерительные схемы которых показаны на рис. 21-3-1 и 21-3-5.

С принципом действия и устройством детекторов других типов, а также с их областью применения можно ознакомиться в [91—94].

Дозирование пробы газа в разделительную колонку хроматографа необходимо осуществлять с высокой точностью и воспроизводимостью. Для каждой колонки устанавливают опытным путем оптимальное значение максимального объема пробы, при котором достигается необходимый эффект разделения компонентов. В большинстве хроматографов, используемых для анализа газовых смесей, оптимальный объем пробы составляет 0,5—20 см^3.

Для введения пробы в разделительную колонку лабораторных хроматографов используются различные по устройству шприцы, специальные краны и дозаторы других типов. В промышленных стационарных хроматографах для введения пробы применяют автоматически действующие дозаторы, например, с возвратно-поступательным движением штока, золотникового типа и клапанного типа, управляемые сжатым воздухом.

В качестве самопишущих приборов применяют микровольтметры, выполняемые на базе потенциометров типа КСП4.

Основные параметры, характеризующие качество и точность хроматографов. При работе хроматографов может иметь место уход нулевой линии на диаграммной ленте микровольтметра с предварительно установленного уровня при выходе прибора на рабочий режим. Это смещение нулевой линии принято называть дрейфом нулевой линии, который нормируют в процентах от ширины поля записи на диаграммной ленте прибора. Дрейф нулевой линии может

быть вызван изменением расхода газа-носителя, нарушением герметичности газовых трактов отдельных элементов хроматографа, изменением температуры и другими факторами.

Кроме дрейфа нулевой линии может иметь место нестабильность ее вследствие влияния флуктуационных шумов. Критерием оценки этого явления является уровень флуктуационных шумов, который определяется как максимальный размах (двойная амплитуда 2А) короткопериодных колебаний нулевой линии в процентах от ширины поля записи на диаграммной ленте прибора. Для современных газовых хроматографов уровень флуктуационных шумов не превышает 1% ширины поля записи на диаграммной ленте [94]. Флуктуационные шумы могут вызываться несовершенством измерительных схем элементов, неисправностями электронных блоков хроматографов и другими факторами.

Важной метрологической характеристикой средств измерений является порог чувствительности. Порог чувствительности измерительного устройства (детектора и микровольтметра) хроматографа позволяет судить о возможности анализа минимальных концентраций отдельных компонентов газовой смеси.

Под порогом чувствительности измерительного устройства хроматографов понимают наименьшее изменение значения измеряемой концентрации примеси вещества в газе-носителе, способное при протекании ее через детектор вызвать изменение показания (отклонение пера) микровольметра, вдвое превышающее уровень флуктуационных шумов. Порог чувствительности, выражаемый в процентах по объему, определяют экспериментальным путем по контрольной смеси, которая аттестована по содержанию контролируемого компонента [94].

При обработке хроматограмм по площадям пиков порог чувствительности в процентах по объему определяется по формуле

$$\Omega = \frac{2CVvA}{Q_0F}, \qquad (21\text{-}6\text{-}1)$$

где C — концентрация контролируемого компонента в смеси по объему; V — объем порции контролируемой смеси, см^3; v — скорость движения диаграммной ленты, мм/мин; $2A$ — максимальный размах короткопериодных колебаний нулевой линии, мм; Q_0 — расход газа-носителя через детектор, см^3/мин; F — площадь пика при стабильной нулевой линии.

Площадь пика F определяется по формуле

$$F = M\int_{\tau_1}^{\tau_2} H(\tau)\,d\tau = MHh, \qquad (21\text{-}6\text{-}2)$$

где $H(\tau)$ — текущее значение высоты пика контрольного вещества; τ_1 и τ_2 — время соответственно начала и окончания выхода пика контрольного вещества; H — среднее значение высоты пика контрольного вещества, мм; h — среднее значение ширины пика конт-

рольного вещества на половине высоты H, мм; M — масштаб измерения.

Если обработка хроматограмм выполняется по высотам пиков, то порог чувствительности в процентах по объему определяют по формуле

$$\Omega = \frac{C2A}{H}. \qquad (21\text{-}6\text{-}3)$$

Порог чувствительности хроматографа «Газохром» 3101, рассматриваемого ниже, в процентах по объему, — не менее $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-1}$ по H_2, CO, CH_4, O_2 и CO_2 соответственно.

Точность работы дозирующих устройств принято характеризовать воспроизводимостью абсолютных значений высоты пиков каждого компонента. Погрешность воспроизводимости абсолютных значений высоты пиков каждого компонента смеси определяется как среднее квадратическое отклонение результата наблюдения в процентах среднего значения высоты пика данного компонента. Расчет оценки погрешности ведется по формулам, приведенным в гл. 1.

Точность работы хроматографов характеризуют обычно воспроизводимостью относительных значений высот пиков каждого определяемого компонента смеси. Для оценки точности воспроизводимости результатов наблюдения выполняют не менее 10 последовательных анализов смеси, которая содержит все подлежащие определению компоненты. На основании этих измерений результаты наблюдений выражаются в виде относительных значений высот пиков каждого компонента

$$|C_{ij}| = \frac{H_{ij}}{\sum\limits_{j=1}^{n} H_{ij}}, \qquad (21\text{-}6\text{-}4)$$

где H_{ij} — измеренное значение высоты пика i-го компонента в опыте j, мм; $\sum\limits_{i=1}^{n} H_{ij}$ — сумма высот пиков n компонентов смеси j-го опыта.

Далее определяют случайные отклонения $|C_{ij}| - \bar{C}_{ij}$, где $\bar{C}_{ij} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} C_{ij}}{m}$ — среднее значение отношения высот пиков i-го компонента; m — число опытов.

Погрешность воспроизводимости относительных значений пиков каждого измеренного компонента определяется как среднее квадратическое отклонение результата наблюдения в процентах по формуле

$$\sigma_{\text{от}} = 100 t_P \sqrt{\frac{\sum\limits_{j=1}^{m} (|C_{ij}| - \bar{C}_{ij})^2}{m-1}}. \qquad (21\text{-}6\text{-}5)$$

Значение t_P определяется по табл. П1-4-1 в зависимости от доверительной вероятности P и $k = m - 1$.

По данным [94] для лабораторных хроматографов значение $\sigma_{от}$ должно быть не более 1,5%, а для промышленных — не более 2,5% при доверительной вероятности 0,683.

Важной характеристикой хроматографов является также воспроизводимость времени удерживания анализируемых веществ.

Хроматограф лабораторного типа «Газохром» 3101. Хроматограф этого типа, широко применяемый в энергетике и других отраслях промышленности, предназначен для анализа продуктов горения различных видов топлива. Он может быть использован также и для анализа других газовых смесей.

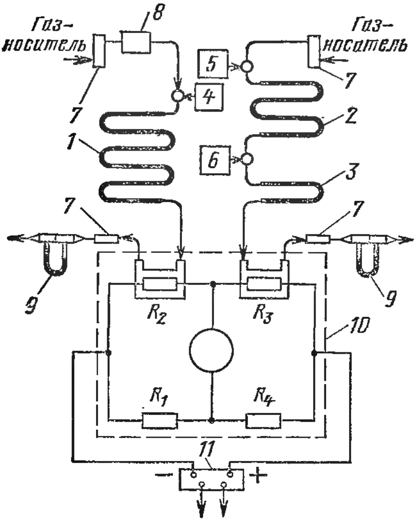


Рис. 21-6-3. Принципиальная схема хроматографа «Газохром» 3101.

1—3 — разделительные колонки; *4—6* — дозируемые объемы; *7* — фильтр-осушитель; *8* — микрокомпрессор; *9* — реометр; *10* — детектор с микровольтметром КСП4-909; *11* — источник питания стабилизированный.

Принципиальная схема хроматографа «Газохром» 3101 показана на рис. 21-6-3. В качестве измерительного устройства в этом хроматографе используется комбинированный детектор (по тепловому эффекту и по теплопроводности) в комплекте с самопишущим микровольтметром типа КСП4-909 класса точности 0,5, диапазон измерения 1000 мкВ. Измерительная схема комбинированного детектора представляет собой неуравновешенный мост, питаемый постоянным током от стабилизированного источника. Плечи моста R_2 и R_3, помещенные в специальные камеры, являются рабочими чувствительными элементами. Эти элементы, выполненные из платиновой проволоки диаметром 0,02 мм в виде спиралей с диаметром витков 0,7 мм, имеют сопротивление около 5 Ом. Сопротивление чувствительного элемента R_3 немного меньше сопротивления элемента R_2. Платиновая спираль чувствительных элементов R_2 и R_3 защищена шарообразной оболочкой диаметром примерно 1,5 мм, выполненной из окиси алюминия. Наружная поверхность шарообразной оболочки чувствительного элемента R_2, так же как и у термохимического газоанализатора на CH_4, покрыта платинопалладиевым катализатором. Резисторы R_1 и R_4 выполнены из манганиновой проволоки. Резисторы для корректировки нуля и регулировки значения выходного сигнала детектора на схеме не показаны. Достоинством комбинированного детектора является то, что он может работать

как в качестве термохимического, так и в качестве термокондуктометрического преобразователя. Это дает возможность использовать один детектор для определения как горючих компонентов, так и негорючих газов. Достоинством этого детектора является и то, что он имеет линейную статическую характеристику.

Хроматограф «Газохром» 3101 может работать на одном или одновременно на двух газах-носителях. В первом случае в качестве газа-носителя используется воздух, а во втором — воздух и аргон. Воздух в газовую линию хроматографа подается с помощью микрокомпрессора мембранного типа, а аргон — из баллона. Давление газа-носителя на входе в хроматограф равно 0,25 кгс/см^2 (0,025 МПа).

В рассматриваемом хроматографе применена двухпоточная схема с параллельным и последовательным присоединением к детектору разделительных колонок, заполненных различными адсорбентами. При этом предусмотрен раздельный ввод анализируемой пробы газа в каждую разделительную колонку. Это обеспечивает возможность выбора оптимальной дозы при определении очень малых концентраций отдельных компонентов и больших количеств других веществ, содержащихся в анализируемой пробе.

Основные технические данные разделительных колонок, комплектуемых с хроматографом «Газохром» 3101, приведены в табл. 21-6-1.

Таблица 21-6-1

Разделительные колонки к прибору «Газохром» 3101

Номер колонки	Материал трубки	Длина, м	Внутренний диаметр, мм	Адсорбент
1	Фторопласт 4Д	2,5	3,5	Активированный уголь АГ-3
2	« »	2,5	3,5	Молекулярные сита CaX (10X)
3	« »	0,5	3,5	Активированный уголь АГ-3
4	« »	1,0	3,5	Силикагель ШСК

В зависимости от выбранных разделительных колонок, комплектуемых с прибором, и схем их соединения с детектором хроматограф «Газохром» 3101 позволяет с большой надежностью определять все необходимые компоненты смеси при исследованиях или периодическом контроле процесса горения, а также при решении других задач.

Для определения H_2, CO, CH_4, O_2, N_2 и CO_2 применяют разделительные колонки с номерами 1, 2 и 3 (табл. 21-6-1), а в качестве газов-носителей используют воздух и аргон. Для определения указанных компонентов схема соединений разделительных колонок с детектором показана на рис. 21-6-3. Принятые на этой схеме

обозначения разделительных колонок соответствуют номерам колонок в табл. 21-6-1.

При включении хроматографа в работу воздух и аргон подаются одновременно в обе линии разделительных колонок с равным расходом (80 см³/мин), который контролируется с помощью реометров. При выходе прибора на режим анализ производят поочередным введением проб в различные точки газовых линий. Первую пробу вводят дозатором *4* в линию воздуха перед разделительной колонкой *1* для определения в смеси горючих компонентов H_2, CO и CH_4. Из вводимой пробы предварительно удаляют CO_2 путем пропускания ее через фильтр с аскаритом. Вторую пробу вводят дозатором *5* в линию аргона перед разделительной колонкой *2* для определения O_2 и N_2. Последнюю пробу вводят дозатором *6* также в линию аргона, но перед разделительной колонкой *3*. В этой колонке происходит отделение CO_2 от суммы всех остальных компонентов, находящихся в пробе. На рис. 21-6-4 представлен примерный вид хроматограммы, иллюстрирующей очередность выхода и время анализа компонентов смеси на хроматографе «Газохром» 3101. Следует отметить, что разделительная колонка *1* (рис. 21-6-3), заполненная активированным углем, не позволяет разделить азот, кислород и аргон. Поэтому на хроматограмме указана сумма ($N_2 + O_2$).

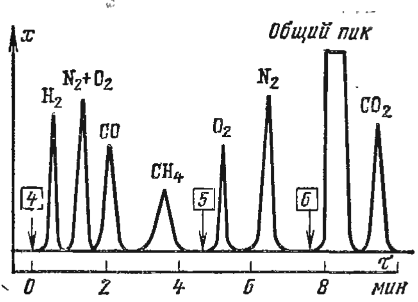


Рис. 21-6-4. Примерный вид хроматограммы, иллюстрирующей очередность выхода и время анализа компонентов смеси на хроматографе «Газохром» 3101.

4—6 — ввод пробы.

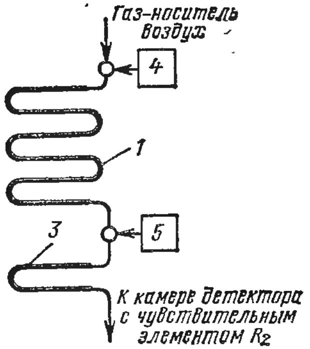


Рис. 21-6-5. Схема соединения разделительных колонок с детектором хроматографа «Газохром» 3101 при определении H_2, CO, CH и CO_2.

При определении только H_2, CO, CH_4 и CO_2, т. е. когда не нужно определять O_2 и N_2 или когда отсутствует аргон в баллоне, применяют разделительные колонки *1* и *3*, заполненные активированным углем, а в качестве газа-носителя используется воздух. В этом случае колонки соединяют по схеме, показанной на рис. 21-6-5. Для определения горючих компонентов H_2, CO и CH_4 пробу вводят дозатором *4* в линию перед колонкой *1*. При этом используется суммарная длина обеих колонок. Для ускорения анализа CO_2 из пробы удаляют, пропуская последнюю через фильтр с аскаритом. Для

определения CO_2 пробу вводят дозатором *5* в линию перед колонкой *3*.

Хроматограф может быть использован для определения H_2, CO, CO_2, предельных и непредельных углеводородов до C_4 включительно. Это дает возможность применять хроматограф для анализа газового топлива, а также при исследованиях топлива. Для определения указанных компонентов применяют разделительные колонки *1*, *3* и *4* (табл. 21-6-1), а в качестве газа-носителя используют воздух. Колонки *1* и *3* присоединяют к детектору так же, как и в предыдущем случае (рис. 21-6-5), а колонку *4* устанавливают параллельно им и присоединяют ее к камере детектора с чувствительным элементом R_3 (рис. 21-6-3). Воздух с помощью микрокомпрессора через тройник подается в обе газовые линии. Линия с разделительными колонками *1*, *2* и двумя дозаторами предназначена для определения тех же компонентов, что в предыдущем варианте (рис. 21-6-5). Вторая линия с колонкой *4* и дозатором перед ней служит для разделения предельных и непредельных углеводородов до C_4 включительно.

Основные сведения о методах калибровки и о количественном определении компонентов анализируемой смеси. Достоверность результатов количественного анализа с помощью хроматографа в большей степени определяется выбором метода калибровки его и точностью ее выполнения. При калибровке хроматографа для каждого компонента анализируемой смеси определяют статическую характеристику измерительного устройства, т. е. функциональную зависимость между выходной величиной (высотой или площадью пика) и входной величиной (концентрацией данного компонента в смеси) в установившемся режиме. Полученная функциональная зависимость или так называемая градуировочная характеристика прибора может быть представлена либо графически, либо в виде калибровочных коэффициентов. Для измерительных устройств с детекторами, имеющими линейную статическую характеристику, достаточно знать калибровочные коэффициенты для каждого компонента анализируемой смеси. Если статическая характеристика детектора нелинейна, то необходимо иметь калибровочный график.

Калибровка хроматографов «Газохром» 3101 производится по чистым газам. Этот метод калибровки хроматографов разработан в ЭНИН [88]. Достоинством его по сравнению с методом абсолютной калибровки является то, что он не требует непосредственного измерения объемов вводимых при калибровке микродоз и объема рабочего дозатора. При калибровке этим методом можно пользоваться любым микродозатором, обеспечивающим воспроизводимость вводимого объема пробы при постоянном режиме работы хроматографа. Таким требованиям отвечают, например, микрошприц с ограничителем обратного хода поршня и микродозатор с движущимся штоком. Метод калибровки хроматографов «Газохром» 3101, разработанный в ЭНИН, как показали проведенные исследования [88, 94], обеспечивает большую точность по сравнению с другими методами

(методами абсолютной калибровки, внутренней нормализации и др.), так как он учитывает специфическую особенность анализа продуктов горения. В продуктах горения анализируемые компоненты имеют резко различающиеся концентрации и, кроме того, определяются обычно не все компоненты, входящие в смесь.

Метод внутренней нормализации предусматривает определение всех компонентов, входящих в анализируемую смесь. При расчете концентрации считают, что площадь (или высота) пиков, умноженная на соответствующий калибровочный коэффициент K, составляет в сумме 100%. В этом случае при стабильной нулевой линии концентрация i-го компонента в процентах по объему определяется по формуле

$$C_i = \frac{K_i F_i}{\sum_{i=1}^{n} K_i F_i}, \qquad (21\text{-}6\text{-}6)$$

где F_i — площадь пика i-го компонента смеси, содержащей n компонентов, определяется по формуле (21-6-2).

При калибровке хроматографа по чистым газам концентрацию i-го компонента анализируемой смеси в процентах по объему определяют по формуле

$$C_i = \frac{C_{ci} H_{i\text{р. д}} M_2}{K H_{i\text{м. д}} M_1}, \qquad (21\text{-}6\text{-}7)$$

где C_{ci} — «чистый» газ со степенью чистоты, например, для окиси углерода $C_{ci} = C_{CO} = 96\%$, для водорода $C_{ci} = C_{H_2} = 99{,}8\%$, для метана $C_{ci} = C_{CH_4} = 99{,}95\%$; $H_{i\text{р. д}}$ — высота пика i-го компонента смеси при введении ее рабочим дозатором (масштаб M_2); $H_{i\text{м. д}}$ — высота пика при введении микродозатором «чистого» газа (масштаб M_1); K — коэффициент.

Коэффициент K определяют предварительно. Для этого с помощью микродозатора вводят в хроматограф любую газовую смесь (например, воздух) и измеряют высоту пика какого-то компонента (например, кислорода) $H_{1\text{м. д}}$ (масштаб M_1). После этого рабочим дозатором вводят в прибор ту же смесь (воздух) и измеряют высоту пика того же компонента (кислорода) $H_{2\text{р. д}}$ (масштаб M_2). Значение K определяют как отношение высоты пиков:

$$K = \frac{M_2 H_{2\text{р. д}}}{M_1 H_{1\text{м. д}}}. \qquad (21\text{-}6\text{-}8)$$

Подробные сведения о методе калибровки хроматографов, разработанном в ЭНИН, и о выполнении анализа содержатся в [88, 94].

21-7. Методические указания по отбору проб газа для анализа

Достоверность анализа продуктов горения (дымовых газов) парогенераторов, промышленных печей и других установок зависит не только от точности выбранных средств измерений, но и от усло-

вий измерения, от выбора места отбора пробы газа для анализа, от способа установки газозаборного устройства и от ряда других факторов.

Для отбора пробы газа для анализа необходимо выбрать такой участок газохода, где процесс сгорания полностью закончился. В выбранном участке газохода газы должны протекать сплошной массой и не должны иметь места обратные течения, завихрения или мертвые зоны. Наиболее подходящим местом для установки газозаборного устройства являются прямые вертикальные участки газохода с нисходящим током газа. Место установки газозаборного устройства должно быть максимально удалено от различных местных сопротивлений, мест изменений сечения газохода и т. д. Отбор пробы газа в непосредственной близости от мест, где возможен подсос воздуха в газоход (например, через щели заслонок, люков и т. п.), недопустим. Если отбор пробы газа на анализ возможен только в горизонтальном участке газохода, то отверстие для установки газозаборного устройства следует выполнять в середине боковой стенки газохода.

При выборе места отбора пробы газа для анализа необходимо иметь в виду, что при отсутствии догорания газов по тракту газохода по мере удаления от топки содержание O_2 вследствие присоса воздуха постепенно увеличивается, а содержание CO_2 уменьшается. Как показывает опыт контроля топочного режима по O_2, результаты анализа газа, отбираемого в поворотной камере (за пароперегревателем), являются более достоверными, чем при отборе пробы за водяным экономайзером.

При отборе проб газа для анализа в различных местах газохода парогенератора рекомендуется контролировать соответствие между содержанием O_2 и CO_2 по этим сечениям газохода. Если в данных конкретных условиях результаты анализа газа в первом сечении газохода (например, в поворотной камере) можно принять как более достоверные, то соответствие содержания O_2 и CO_2 в двух местах отбора (например, в поворотной камере и за водяным экономайзером) при отсутствии химической неполноты горения может быть определена по формуле [94]:

$$O_2^{II} = \frac{CO_2^{II} O_2^{I} + 20{,}9\,[CO_2^{I} - CO_2^{II}]}{CO_2^{I}},$$

где O_2^{I} и CO_2^{I} — содержание газов в первом сечении газохода, проценты по объему; O_2^{II} и CO_2^{II} — содержание газов во втором сечении газохода, проценты по объему.

Проба газа для анализа забирается газозаборным устройством либо непосредственно из газохода, например за водяным экономайзером парогенератора, либо из специально установленной стальной шунтовой трубы, в которую дымовые газы поступают из газохода за пароперегревателем.

На рис. 21-7-1 показано газозаборное устройство, установленное в вертикальном газоходе с нисходящим током газа. Это устройство состоит из керамического фильтра *1* с защитным стальным козырьком *2*, газоотводящей трубы *3*, крестовины *4*, одноходового крана *5* и пробки *6*. Керамический фильтр предназначен для очистки газа от механических примесей (золы и сажи). Содержание в газе механических примесей не должно превышать 15—20 г/м³. Штуцер крана *5* при помощи трубы соединяют с блоком очистки газоанализатора (см. рис. 21-4-4). Боковое отверстие крестовины, закрытое пробкой *6*, предназначено для периодической чистки газоотводящей трубы и керамического фильтра сжатым воздухом. Кран на крестовине позволяет отключать газозаборное устройство от газовой линии приемного преобразователя газоанализатора, например, во время чистки газоотводящей трубы и керамического фильтра или при проверке газовой линии на плотность. Газоотводящую трубу устанавливают под углом 15—20° к горизонту, обеспечивая этим сток конденсата, образующегося при охлаждении газа в газозаборном устройстве, в сосуд блока очистки (рис. 21-4-4). Если эти условия не соблюдаются, конденсат, попадая в керамический фильтр, образует с золой и сажей плотную массу, закупоривающую поры фильтра.

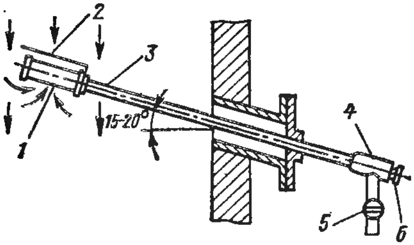


Рис. 21-7-1. Схема установки газоотборного устройства в вертикальном газоходе.

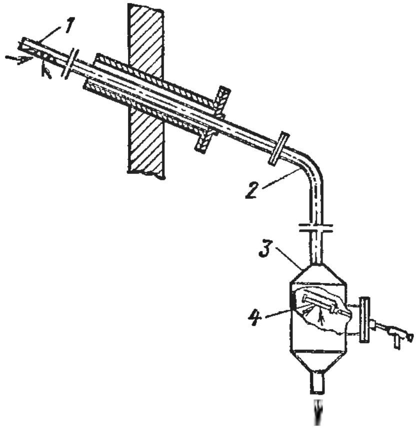


Рис. 21-7-2. Схема отбора газа из поворотной камеры с использоваиием шунтовой трубы.

Схема отбора газа из поворотной камеры для определения O_2 показана на рис. 21-7-2. Здесь отбор газа из газохода осуществляется через отверстия в стальной трубе *1* с внутренним диаметром 69 мм. Отбираемый газ поступает в шунтовую трубу *2*, которая нижним своим концом должна быть присоединена к газоходу за последней поверхностью нагрева. В расширенный участок *3* шунтовой трубы, корпус которого имеет внутренний диаметр 310 мм, установлено газозаборное устройство с керамическим фильтром *4*, аналогичное показанному на рис. 21-7-1. Длина заборной трубы *1*, а также размеры других участков шунтовой трубы задаются

проектирующей организацией в зависимости от типа парогенератора.

Рассмотренный вариант отбора газа для контроля топочного режима парогенератора по O_2 является предпочтительным, так как результаты анализа в данном случае будут более достоверными.

При установке газозаборного устройства (рис. 21-7-1) необходимо иметь в виду, что температура газовой среды, в которую погружены газоотводящая труба с керамическим фильтром, имеет существенное значение для правильной и бесперебойной работы газоанализатора. Газ в месте отбора пробы для анализа должен иметь температуру не ниже 200 и не выше 500° С. Нижний температурный предел обусловлен тем, что при недостаточно высокой температуре дымовых газов, обтекающих керамический фильтр, возможно засорение его поверхности конденсирующимися несгоревшими продуктами возгонки. Верхний температурный предел определяется, с одной стороны, условиями прочности газозаборного устройства, а с другой — опасностью восстановления CO_2 в CO и O_2. Поэтому в случае низких температур необходимо обеспечить подогрев газозаборного устройства, а в случае высоких температур, как, например, при отборе дымовых газов в газоходах промышленных печей, применять охлаждаемое водой газозаборное устройство.

Для систематического непрерывного контроля топочного режима при ширине агрегата более 6 м, а также при наличии разделительной стенки топки необходимо устанавливать два газозаборных устройства (справа и слева) и два газоанализатора.

Для уменьшения запаздывания показаний газоанализатора необходимо приемный преобразователь устанавливать возможно ближе к заборному устройству.

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ПАРА, КОНДЕНСАТА И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ВТОРАЯ

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ПАРА, КОНДЕНСАТА И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ

22-1. Общие сведения

Широкое внедрение в энергетику мощных энергоблоков на высокие и закритические параметры привело к необходимости организации надежного автоматического непрерывного и периодического химического контроля за водным режимом электростанций и работой установок водо- и конденсатоочистки. Возросла также важность вопросов автоматизации процессов водоприготовления.

Применяемые на многих электростанциях ручные методы химического контроля некоторых показателей качества не удовлетворяют современным повышенным требованиям. Эти методы требуют много времени, обладают недостаточной точностью результатов анализа и непригодны для оперативного контроля за водным режимом и автоматизации процессов водоприготовления.

Применение на электростанциях автоматических средств измерений (анализаторов жидкости) повышает надежность химического контроля за показателями качества питательной воды парогенераторов, пара и конденсата и процессами химического обессоливания добавочной воды и очистки конденсата турбин. Необходимые средства измерений для автоматического химического контроля за водным режимом электростанций и водоподготовительными установками рассмотрены в [95, 96].

Для осуществления контроля за водным режимом электростанций и работой установок очистки воды и конденсата необходимо измерять разнообразные показатели качества отличающихся по химическому составу сред. Эти среды находятся под различным избыточным давлением, имеют различную температуру, отличаются по количеству механических и других примесей. Вследствие этого во многих случаях для снижения давления и температуры, а также для удаления механических примесей или растворенных газов из пробы контролируемой среды необходимо перед первичным преобразователем устанавливать специальные дополнительные устройства. Для отбора представительной пробы среды используют различные пробоотборные устройства. Применение указанных дополнительных устройств позволяет создать для первичных измери-

тельных преобразователей одинаковые нормальные эксплуатационные условия, а вместе с тем повысить точность измерений.

Ниже будут рассмотрены основные методы и автоматические анализаторы жидкости, используемые для химического контроля в энергетике и в других отраслях промышленности. С другими не рассматриваемыми в этой главе методами и анализаторами жидкости можно познакомиться в работах [75, 86].

22-2. Измерение удельной электропроводности водных растворов

Основные сведения. Измерение удельной электропроводности водных растворов получило широкое распространение в лабораторной практике, при автоматическом химическом контроле водного режима паросиловых установок, эффективности работы установок очистки воды и промышленных теплообменных и других установок, а также различных показателей качества, характеризующих химико-технологические процессы.

Технические средства, предназначенные для измерения удельной электропроводимости водных растворов, принято называть кондуктометрическими анализаторами жидкости. Шкалу вторичных приборов кондуктометров жидкости (лабораторных и промышленных) для измерения удельной электропроводности градуируют в единицах сименс на сантиметр ($См \cdot см^{-1}$) или микросименс на сантиметр ($мкСм \cdot см^{-1}$). Кондуктометры жидкости, которые применяют в производственных условиях для измерения показателей качества, характеризующих содержание солей в паре, конденсате и питательной воде парогенераторов, обычно называют солемерами. Шкалу вторичных приборов солемеров градуируют по NaCl (на условное содержание в растворе этих солей) в следующих единицах: миллиграмм на килограмм (мг/кг), микрограмм на килограмм (мкг/кг) или миллиграмм на литр (мг/л) и микрограмм на литр (мкг/л). Кондуктомеры жидкости, используемые для измерения концентрации растворов солей, кислот, щелочей и т. д., называют часто концентратомерами. Шкала вторичных приборов концентратомеров градуируется в процентах значения массовой концентрации. Кондуктометрические анализаторы жидкости используются также и в качестве сигнализаторов.

При повышенных требованиях к показателям качества питательной воды, пара и конденсата необходимо производить измерение малых значений электропроводности, не превышающих 5—6 $мкСм \cdot см^{-1}$. При контроле за истощением фильтров очистительных установок значение измеряемой электропроводности воды составляет $5 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-3}$ $См \cdot см^{-1}$, а при контроле концентрации растворов реагентов — от 10^{-3} до 0,7 $См \cdot см^{-1}$ [96].

Измерение электропроводности водных растворов обычно производят с помощью электродного кондуктометрического измерительного преобразователя, состоящего из двух электродов, распо-

ложенных в сосуде, в который поступает контролируемый водный раствор. Устройство этих преобразователей и применяемые измерительные схемы кондуктометров жидкости рассматриваются ниже. Для измерения электропроводности растворов широко применяют также безэлектродные кондуктометры жидкости.

Удельная электропроводность представляет собой величину, обратную удельному сопротивлению:

$$\varkappa = \frac{1}{\rho}. \tag{22-2-1}$$

Здесь $\varkappa$ — удельная электропроводность, См·см$^{-1}$, а ρ — удельное сопротивление, Ом·см, определяемое выражением

$$\rho = R_C \frac{F_{эф}}{l}, \tag{22-2-2}$$

где R_C — электрическое сопротивление фиксированного объема раствора с концентрацией C между металлическими электродами, Ом; $F_{эф}$ — эффективное поперечное сечение раствора, через которое протекает ток, см^2; l — расстояние между электродами, см.

Согласно уравнению (22-2-2) выражение (22-2-1) принимает вид:

$$\varkappa_C = \frac{1}{R_C} \frac{l}{F_{эф}} = G_C k_п = k_п R_C^{-1}, \tag{22-2-3}$$

где $G_C = 1/R_C$ — электрическая проводимость фиксированного объема раствора, См; $k_п = l/F_{эф}$ — постоянная электродного преобразователя, см$^{-1}$.

Из выражения (22-2-3) имеем:

$$G_C = \frac{\varkappa_C}{k_п}. \tag{22-2-4}$$

Для преобразователей с простой конфигурацией электродов постоянная $k_п$ может быть определена расчетным путем. Если преобразователь имеет сложную конструкцию, то постоянная $k_п$ определяется экспериментально.

Следует отметить, что на основании изучения удельной электропроводимости мы не имеем возможности производить сравнение значений электропроводимости растворов между собой в зависимости от их концентрации. Это становится возможным при введении понятия эквивалентной электропроводности. Кольрауш эквивалентной электропроводностью назвал величину

$$\Lambda = \frac{\varkappa}{\eta}, \tag{22-2-5}$$

где Λ — эквивалентная электропроводность, См·см^2/г-экв; η — эквивалентная концентрация растворенного вещества, г-экв·см$^{-3}$.

Значение электропроводности растворов зависит не только от эквивалентной концентрации и эквивалентной электропроводности, но также и от степени электролитической диссоциации раствора.

Следовательно, в общем случае, когда не все молекулы распались на ионы, для удельной электропроводности получим следующее уравнение:

$$\varkappa = \alpha\eta\Lambda. \qquad (22\text{-}2\text{-}6)$$

Здесь α — степень электролитической диссоциации, т. е. отношение числа диссоциированных молекул электролита к общему числу растворенных молекул. Электролитами называют вещества, водные растворы которых проводят электрический ток (соли, щелочи и кислоты). Степень электролитической диссоциации α зависит как от природы растворенного вещества, так и от концентрации раствора. Числовое значение α увеличивается с разбавлением раствора.

В зависимости от степени электролитической диссоциации электролиты делятся на сильные (соляная, серная, азотная кислоты, щелочи, почти все соли) и слабые (например, органические кислоты). Для сильных электролитов, которые в водных растворах при малой концентрации почти полностью распадаются на ионы, значение α принимают равным единице.

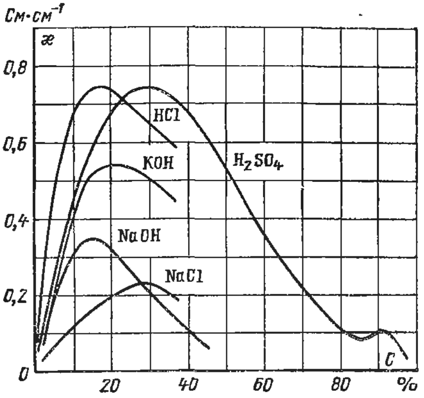


Рис. 22-2-1. Зависимость электропроводности водных растворов некоторых веществ от их концентрации при 18° С.

Уравнение (22-2-6) можно представить в следующем виде:

$$\varkappa = \alpha\eta\,(l_к + l_а), \qquad (22\text{-}2\text{-}7)$$

где $l_к$ и $l_а$ — подвижность соответственно катионов и анионов ($l_к + l_а = \Lambda$).

Подвижности ионов представляют собой произведение их абсолютной скорости $v_к$ и $v_а$ на число Фарадея F.

Электропроводность водных растворов находится в сложной зависимости от концентрации раствора. На рис. 22-2-1 представлены зависимости удельной электропроводности $\varkappa$ водных растворов некоторых веществ от их концентрации. Из этого графика видно, что однозначная зависимость между электропроводностью раствора и концентрацией имеет место лишь в том случае, если измерения электропроводности выполняются в области сравнительно низких концентраций. Концентрации растворенных веществ, которые приходится определять при контроле качества пара, конденсата, питательной и котловой воды, соответствуют начальным участкам приведенных на рис. 22-2-1 кривых, где удельная электропроводность непрерывно увеличивается с ростом концентраций.

При измерении электропроводности конденсата пара и питательной воды, являющихся водными растворами с очень малой концентрацией солей, степень электролитической диссоциации можно

принять равной единице. В этом случае для определения электропроводности можно использовать упрощенное уравнение

$$\varkappa = \eta \Lambda_\infty. \qquad (22\text{-}2\text{-}8)$$

Здесь Λ_∞ — эквивалентная электропроводность при бесконечном разбавлении, которая определяется равенством

$$\Lambda_\infty = l_{к,\infty} + l_{а,\infty}, \qquad (22\text{-}2\text{-}9)$$

где $l_{к,\infty}$ и $l_{а,\infty}$ — подвижности соответственно катионов и анионов при бесконечном разбавлении раствора (для NaCl $l_{Na,\infty} = 43{,}16$; $l_{Cl,\infty} = 65{,}24$).

Значения Λ, Λ_∞, $l_{к,\infty}$, $l_{а,\infty}$ и температурных коэффициентов подвижностей ионов, соответствующие температуре 18° С, приведены в [97]. Температура $t_0 = 18°$ С при измерении удельной электропроводности водных растворов обычно принимается за нормальную (исходную), для которой приводятся данные по электропроводности.

При измерении электропроводности необходимо учитывать влияние температуры раствора на показания прибора, так как с изменением температуры раствора на 1° С его электропроводность изменяется на 1,5—2,5%. Этим определяется важность поддержания постоянства температуры анализируемого раствора при измерении электропроводности или использования эффективно работающей автоматической температурной компенсации, уменьшающей влияние колебаний температуры раствора на показания прибора.

Зависимость электропроводности водных растворов от температуры t при малых отклонениях от 18° С выражается формулой

$$\varkappa_t = \varkappa_{18}\left[1 + \alpha_э (t - 18)\right]. \qquad (22\text{-}2\text{-}10)$$

При температуре t, отличающейся от 18° С на 10—25° С и более, необходимо пользоваться уравнением

$$\varkappa_t = \varkappa_{18}\left[1 + \alpha_э (t - 18) + \beta_э (t - 18)^2\right], \qquad (22\text{-}2\text{-}11)$$

где $\alpha_э$ — температурный коэффициент электропроводности ($\alpha_{э,NaCl} = 0{,}0227$ 1/°С), согласно формуле

$$\alpha_э = \frac{l_{к,18}\alpha_{lк} + l_{а,18}\alpha_{lа}}{l_{к,18} + l_{а,18}}. \qquad (22\text{-}2\text{-}12)$$

Здесь $\alpha_{lк}$ и $\alpha_{lа}$ — температурные коэффициенты подвижности соответственно катиона $l_{к,18}$ и аниона $l_{а,18}$ (для NaCl $\alpha_{l_{Na}} = 0{,}0244$ 1/°С; $\alpha_{l_{Cl}} = 0{,}0216$ 1/°С).

Температурный коэффициент электропроводности $\beta_э$ (для NaCl $\beta_{э,NaCl} = 0{,}000086$ 1/°С²), по данным Кольрауша, связан с коэффициентом $\alpha_э$ соотношением

$$\beta_э = 0{,}0163(\alpha_э - 0{,}0174). \qquad (22\text{-}2\text{-}13)$$

Зависимость электрического сопротивления фиксированного объема раствора между электродами преобразователя от температуры t, незначительно отличающейся от 18° С, выражается формулой

$$R_t = \frac{R_{18}}{1 + \alpha_э (t - 18)}. \tag{22-2-14}$$

При температуре t, отличающейся от 18° С на 10—25° С и более, следует пользоваться уравнением

$$R_t = \frac{R_{18}}{1 + \alpha_э (t - 18) + \beta_э (t - 18)^2}. \tag{22-2-15}$$

При контроле водного режима электростанций концентрацию солей обычно выражают в миллиграммах на литр (мг/л) или микрограммах на литр (мкг/л). В приведенных выше уравнениях используется эквивалентная концентрация. Пересчет этих концентраций производят по формуле

$$\eta = \frac{C}{10^6 A}, \tag{22-2-16}$$

где η — эквивалентная концентрация, г-экв·см$^{-3}$, C — концентрация, мг/л; A — эквивалентная масса ионов растворенного вещества, согласно формуле

$$A = A_к + A_а.$$

Здесь $A_к$ и $A_а$ — эквивалентная масса соответственно катиона и аниона растворенного вещества (для NaCl $A_{Na} = 23{,}00$; $A_{Cl} = 35{,}46$; $A_{NaCl} = 58{,}46$). Значения эквивалентных масс ионов веществ, встречающихся при измерении электропроводности водных растворов, приведены в [97, 98].

Выше отмечалось, что градуировка кондуктометров жидкости (солемеров) производится по NaCl, т. е. на условное содержание в растворе этой соли. Это обусловлено тем, что среди различных солей, содержащихся в конденсате водяного пара и питательной воде парогенераторов, средним значением электропроводности обладает хлористый натрий (NaCl).

Электропроводность водного раствора NaCl при малых концентрациях и при исходной температуре $t_0 = 18°$ С может быть определена с учетом выражений (22-2-8), (22-2-9) и (22-2-16) по уравнению

$$\varkappa_{NaCl,\, t_0} = (l_{Na,\, \infty} + l_{Cl,\, \infty}) \frac{10^{-6} C_{NaCl}}{A_{NaCl}}. \tag{22-2-17}$$

Подставляя в это выражение значения $l_{Na,\infty}$ $l_{Cl,\infty}$ и A_{NaCl}, получаем:

$$\varkappa_{NaCl,\, t_0} = (43{,}16 + 65{,}24) \frac{10^{-6} C_{NaCl}}{58{,}46} = 1{,}854 \cdot 10^{-6} C_{NaCl}. \tag{22-2-18}$$

Градуировку кондуктометров жидкости (солемеров) обычно производят при нормальной температуре $t_н = 20°$ С. Для пересчета $\varkappa_{NaCl}$ на значение температуры $t_н$ можно воспользоваться формулой (22-2-10)

$$\varkappa_{NaCl,\, t_н} = \varkappa_{NaCl,\, t_0} [1 + \alpha_{э,\, NaCl} (t_н - t_0)]. \tag{22-2-19}$$

Подставляя в это уравнение значения $\varkappa_{NaCl,t_0}$, $t_н$, t_0 и $\alpha_{э,NaCl}$, получаем:

$$\varkappa_{NaCl,\ t_н} = 1{,}854 \cdot 10^{-6} C_{NaCl} [1 + 0{,}0227 (20 - 18)] = 1{,}938 \cdot 10^{-6} C_{NaCl}. \qquad (22\text{-}2\text{-}20)$$

Электрическое сопротивление фиксированного объема раствора NaCl преобразователя при малой его концентрации и при температуре $t_н = 20°$ С может быть определено с учетом выражений (22-2-3) и (22-2-20) по формуле

$$R_{NaCl,\ t_н} = \frac{k_п}{\varkappa_{NaCl,\ t_н}} = \frac{10^6 k_п}{1{,}938 C_{NaCl}}. \qquad (22\text{-}2\text{-}21)$$

В конденсате пара и питательной воде парогенераторов кроме небольшого количества солей обычно присутствуют растворенные газы — аммиак (NH_3) и углекислый газ (CO_2) — и гидразин. Наличие растворенных газов и гидразина изменяет электропроводность конденсата и питательной воды, и показания кондуктометра жидкости (солемера) не соответствуют однозначно условному содержанию солей, т. е. значению сухого остатка, полученного путем выпарки конденсата или питательной воды. Это приводит к необходимости внесения поправок в показания прибора или применения дополнительного устройства для удаления из пробы растворенных газов и гидразина.

Дополнительное устройство в виде дегазатора для удаления из пробы растворенных газов не исключает влияния на показания кондуктометрического анализатора гидразина. Применяемый в настоящее время фильтр, заполненный катионитом марки КУ-2, позволяет исключить влияние на показания прибора аммиака и гидразина.

Электродные кондуктометрические преобразователи. Электродные преобразователи, применяемые для измерения электропроводности растворов, изготовляют для лабораторных исследований различных растворов и для технических измерений. Измерения в лабораторных условиях производят на переменном токе. При этом необходимо отметить, что кондуктометрический метод измерения на переменном токе остается общепринятым в повседневной лабораторной практике. Технические измерения электропроводности растворов с использованием электродных преобразователей производят, как правило, на переменном токе с частотой 50 Гц.

Устройство, размеры, а следовательно, и постоянная электродных преобразователей в существенной степени зависят от измеряемого значения электропроводности раствора. В технических измерениях наиболее распространены преобразователи с цилиндрическими коаксиальными и в меньшей степени — с плоскими электродами. Устройство преобразователей с цилиндрическими коаксиальными электродами схематично показано на рис. 22-2-2. У преобразователя, представленного на рис. 22-2-2, *а*, наружный цилиндрический электрод является одновременно и корпусом его. Второй преобразователь (рис. 22-2-2, *б*) имеет также цилиндрические коаксиальные электроды, но они расположены в стальном его корпусе, к которому приварен один электрод. Этот преобразователь исполь-

зуется в солемерах ЦКТИ с малогабаритными концентраторами [101]. В преобразователь через левый штуцер из концентратора поступает дегазированная и обогащенная проба, имеющая постоянную температуру, близкую к 100° С. Верхний штуцер преобразователя соединяют стальной трубой с паровым пространством малогабаритного концентратора, солемера. Схема устройства преобразователя с плоскими электродами приведена на рис. 22-2-3. Особенность преобразователя, показанного на рис. 22-2-3, заключается в том, что площади его электродов и эффективного сечения раствора, через которое протекает ток, неодинаковы. Кроме рассмотренных

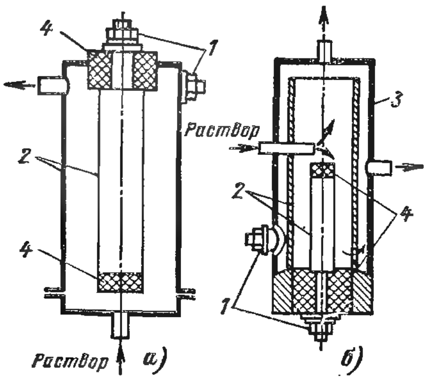


Рис. 22-2-2. Устройство преобразователей с цилиндрическими коаксиальными электродами.

1 — зажимы для присоединения проводов; *2* — электроды; *3* — стальной корпус; *4* — изоляторы.

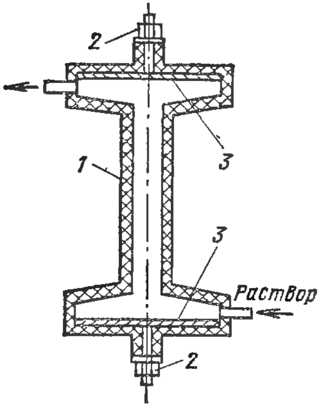


Рис. 22-2-3. Устройство преобразователя с плоскими электродами.

1 — корпус преобразователя; *2* — зажимы для присоединения проводов; *3* — электроды.

проточных электродные преобразователи выполняют также погружного типа, непосредственно погружаемые в трубопровод с жидкостью, электропроводность (или концентрацию) которой необходимо контролировать. Электроды преобразователей для технических измерений выполняют из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т. Электроды преобразователей для лабораторных исследований растворов электролитов изготовляют из платины. Для уменьшения поляризации электродов их покрывают слоем платиновой черни. Сосуды этих преобразователей выполняют обычно из стекла. Размеры сосудов выбирают в зависимости от ожидаемого значения электропроводности исследуемого раствора.

На электродах преобразователя, соприкасающихся с раствором, протекают сложные электрохимические процессы. Пространство между электродами заполнено при измерении электропроводности водных растворов средой с высоким значением диэлектрической проницаемости. По этим причинам фиксированный объем раствора между электродами преобразователя при измерении на переменном токе представляет комплексное электрическое сопротивление — комбинацию активных

и емкостных составляющих. Эквивалентная электрическая схема электродного преобразователя с учетом электродных процессов представлена на рис. 22-2-4. К электродным процессам относятся процесс электролиза раствора при прохождении через него электрического тока и процесс образования двойного электрического слоя на границе раздела сред «металл электрода — раствор». Образование двойного электрического слоя происходит за счет воздействия внешнего электрического поля, неравенства химических потенциалов ионов металла электродов и ионов в растворе и специфической адсорбции ионов и полярных молекул. В цепи переменного тока двойной электрический слой эквивалентен электрической емкости $C_{д1}$ и $C_{д2}$. Электрическая емкость двойного слоя $C_{д1}$ и $C_{д2}$ не зависит от частоты напряжения питания и является функцией концентрации и размера приложенного к электродам потенциала.

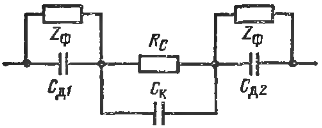


Рис. 22-2-4. Эквивалентная электрическая схема электродного преобразователя.

Эквивалентная электрическая схема процесса поляризации представляется в общем случае нелинейным активно-емкостным сопротивлением $Z_ф$, которое называют фарадеевским импедансом. Одна из моделей эквивалентной схемы определяется выражением

$$Z_ф = \frac{k(1-j)}{\sqrt{\omega}}, \qquad (22\text{-}2\text{-}22)$$

где k — постоянная, Ом $\cdot$ с$^{-1/2}$; ω — угловая скорость, рад/с ($\omega = 2\pi f$); $j = \sqrt{-1}$.

При осуществлении технических измерений стремятся создать такую конструкцию электродного преобразователя, чтобы его полное сопротивление определялось активным сопротивлением фиксированного объема раствора между электродами R_C, а влияние электрохимических процессов и обусловленных этими процессами реактивных составляющих электрического сопротивления было бы пренебрежимо мало. Если эти условия выполнены с требуемым приближением, то электрическое сопротивление фиксированного объема раствора между электродами преобразователя определяется согласно выражению (22-2-3) следующей формулой:

$$R_C = k_п \varkappa^{-1}. \qquad (22\text{-}2\text{-}23)$$

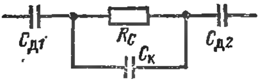


Рис. 22-2-5. Упрощенная эквивалентная электрическая схема электродного преобразователя.

Рассмотрим упрощенную эквивалентную электрическую схему электродного преобразователя, которая не учитывает эффекта электролиза. В этом случае полное сопротивление преобразователя будет определяться, как это следует из схемы, показанной на рис. 22-2-5, емкостями двойного слоя на электродах $C_{д1}$ и $C_{д2}$, активным электрическим сопротивлением раствора между электродами R_C и емкостью $C_к$, шунтирующей это сопротивление. Емкость $C_к$ может быть названа «конструктивной». Следует отметить, что вода обладает большим по сравнению с другими жидкостями значением относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_в$ (для конденсата $\varepsilon_в = 80{,}1$ при 20° С), что приводит к необходимости учета емкости между электродами.

Используя известное соотношение, которое определяет модуль емкостного сопротивления $X = 1/\omega C$, можно провести качественный анализ влияния емкостных составляющих и частоты ($f = \omega/2\pi$) на модуль полного сопротивления преобразователя.

При допущении, что активное сопротивление не зависит от частоты напряжения на электродах, легко заметить, что с возрастанием ω относительное влияние емкости двойного слоя на модуль полного сопротивления уменьшается, а «конструктивной» емкости $C_к$ — увеличивается. Можно показать, что относительное влияние емкости $C_к$ практически не зависит от формы электродов, их взаимного

расположения и расстояния между ними. Действительно, конструктивные изменения влияют практически в равной степени на активное сопротивление преобразователя и на значение емкости $C_к$. Степень же влияния емкости двойного слоя можно изменять конструктивными приемами. При увеличении площади электродов преобразователя возрастает емкость двойного слоя, а уменьшение площади эффективного сечения раствора, через который проходит ток, приводит к возрастанию активного сопротивления раствора. Относительное влияние емкости двойного слоя снижается по сравнению с преобразователем, у которого площадь электродов и эффективного сечения раствора одинаковы.

Для уменьшения влияния на точность измерения электропроводности растворов поляризации электродов применяют четырехэлектродные преобразователи, например, в кондуктометрических анализаторах для чистых водных растворов применяют преобразователи типов КК-2 и КК-3 с диапазоном измерений $1 \cdot 10^{-4}$—$1 \cdot 10^{-1}$ См·см$^{-1}$. Два электрода этого преобразователя являются токовыми, питаемыми напряжением переменного тока через большое ограничивающее сопротивление, а два других, расположенных между ними,— потенциальными. В этом случае напряжение, измеряемое на потенциальных электродах, однозначно определяет концентрацию контролируемого раствора и не зависит от частичной поляризации токовых электродов.

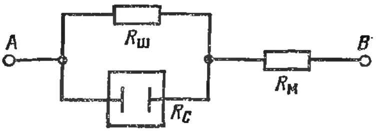


Рис. 22-2-6. Принципиальная схема электродного преобразователя с температурной компенсацией.

Способы температурной компенсации и типовые измерительные схемы кондуктометрических анализаторов. Температурная компенсация осуществляется с помощью дополнительных элементов в цепи электродного преобразователя или в измерительной схеме кондуктометра жидкости, уменьшающих влияние отклонения температуры раствора от 20° С на показания прибора. Автоматическая температурная компенсация не исключает полностью влияния температуры раствора на показания прибора, что представляет большие трудности, но значительно его уменьшает.

Из числа применяемых способов автоматической температурной компенсации в кондуктометрах жидкости наиболее часто используется электродный преобразователь с температурной компенсацией, схема которого показана на рис. 22-2-6. Схема температурной компенсации электродного преобразователя образована параллельно и последовательно включенными с сопротивлением раствора R_C резисторами $R_ш$ и $R_м$. Сопротивление раствора R_C с резистором $R_ш$ обладает отрицательным, а последовательно включенный резистор $R_м$ — положительным температурным коэффициентом электрического сопротивления. Резистор $R_ш$ изготовляют из манганиновой проволоки, а резистор $R_м$ — из медной проволоки. Для изготовления резистора $R_м$ иногда применяют никелевую или платиновую проволоку. Резистор $R_м$, выполняемый аналогично с чувствительным элементом термометра сопротивления, помещают во внутренний

электрод преобразователя (рис. 22-2-2, a). Резистор $R_ш$, включенный параллельно с сопротивлением раствора R_C, линеаризует зависимость $R_п = f(t)$, а вместе с тем и уменьшает температурный коэффициент приведенного сопротивления $R_п = R_C R_ш (R_C + R_ш)^{-1}$. Это создает более благоприятные условия для использования компенсирующего резистора $R_м$.

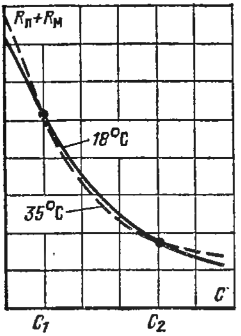


Рис. 22-2-7. Зависимость полного сопротивления цепи преобразователя ($R_п + R_м$) от концентрации C для температур 18 и 35° С.

Расчет параметров схемы температурной компенсации обычно производится из условия полной температурной компенсации для двух заданных концентраций C_1 и C_2 и определенных значений температур t_1 и t_2, выбираемых с учетом возможных отклонений температуры раствора от 20° С [98; 99]. В этом случае измерения концентрации (электропроводности) необходимо производить в интервале от C_1 до C_2, так как погрешность при изменении температуры раствора за границами этого интервала может быть больше, чем внутри него (рис. 22-2-7).

Полное сопротивление цепи преобразователя относительно зажимов A и B (см. рис. 22-2-6) при концентрации раствора C и температуре его t определяется выражением

$$R_{ц,\,C,\,t} = \frac{R_{C,\,t} R_ш}{R_{C,\,t} + R_ш} + R_{м,\,t} = \frac{1}{R_{C,\,t}^{-1} + R_ш^{-1}} + R_{м,\,t},$$

или

$$R_{ц,\,C,\,t} = (G_{C,\,t} + G_ш)^{-1} + R_{м,\,t}. \tag{22-2-24}$$

Здесь, а также в последующих уравнениях, индексами указано, к какой концентрации раствора и температуре относятся рассматриваемые величины (сопротивление R, электрическая проводимость G, удельная электропроводность $\varkappa$).

Условие полной температурной компенсации сводится к равенствам

$$\left.\begin{aligned} (G_{C_1,\,t_1} + G_ш)^{-1} + R_{м,\,t_1} &= (G_{C_1,\,t_2} + G_ш)^{-1} + R_{м,\,t_2};\\ (G_{C_2,\,t_1} + G_ш)^{-1} + R_{м,\,t_1} &= (G_{C_2,\,t_2} + G_ш)^{-1} + R_{м,\,t_2}, \end{aligned}\right\} \tag{22-2-25}$$

где

$$G_{C_1,\,t_1} = G_{C_1,\,t_0}\left[1 + \alpha_э (t_1 - t_0) + \beta_э (t_1 - t_0)^2\right] = G_{C_1,\,t_0} a_{t_1};$$

$$G_{C_1,\,t_2} = G_{C_1,\,t_0}\left[1 + \alpha_э (t_2 - t_0) + \beta_э (t_2 - t_0)^2\right] = G_{C_1,\,t_0} a_{t_2};$$

$$G_{C_2,\,t_1} = G_{C_2,\,t_0}\left[1 + \alpha_э (t_1 - t_0) + \beta_э (t_1 - t_0)^2\right] = G_{C_2,\,t_0} a_{t_1};$$

$$G_{C_2,\,t_2} = G_{C_2,\,t_0}\left[1 + \alpha_э (t_2 - t_0) + \beta_э (t_2 - t_0)^2\right] = G_{C_2,\,t_0} a_{t_2};$$

$$R_{м,\,t_1} = R_{м,\,t}\,\frac{1 + \alpha_м t_1}{1 + \alpha_м t_0} = R_{м,\,t_0} a_{м,\,t_1};$$

$$R_{м,\,t_2} = R_{м,\,t_0}\,\frac{1 + \alpha_м t_2}{1 + \alpha_м t_0} = R_{м,\,t_0} a_{м,\,t_2}.$$

В последних двух выражениях $\alpha_м$ — температурный коэффициент сопротивления меди, соответствующий 0° С ($\alpha_м = 4{,}26 \cdot 10^{-3}$ 1/°С). При расчете параметров схемы температурной компенсации принимают $t_0 = 18$° С.

В целях удобства выполнения расчета параметров схемы температурной компенсации представим равенства (22-2-25) в следующем виде:

$$(G_{C_1,\ t_0}a_{t_1}+G_{ш})^{-1}+R_{м,\ t_0}a_{м,\ t_1}=(G_{C_1,\ t_0}a_{t_2}+G_{ш})^{-1}+R_{м,\ t_0}a_{м,\ t_2};$$
$$(G_{C_2,\ t_0}a_{t_1}+G_{ш})^{-1}+R_{м,\ t_0}a_{м,\ t_1}=(G_{C_2,\ t_0}a_{t_2}+G_{ш})^{-1}+R_{м,\ t_0}a_{м,\ t_2}.$$

Решая эти уравнения, в которых заданными величинами являются G_{C_1,t_0}, G_{C_2,t_0}, a_{t_1}, a_{t_2}, $a_{м,t_1}$ и $a_{м,t_2}$, относительно $G_ш$ и $R_{м,t_0}$ получаем:

$$G_ш=\sqrt{G_{C_1,\ t_0}G_{C_2,\ t_0}a_{t_1}a_{t_2}}; \qquad (22\text{-}2\text{-}26)$$

$$R_{м,\ t_0}=\frac{G_{C_1,\ t_0}(a_{t_1}-a_{t_2})}{(G_{C_1,\ t_0}a_{t_2}+G_ш)(G_{C_1,\ t_0}a_{t_1}+G_ш)(a_{м,\ t_1}-a_{м,\ t_2})}. \qquad (22\text{-}2\text{-}27)$$

Пользуясь уравнением (22-2-26) с учетом выражений (22-2-3) и (22-2-4), получаем:

$$R_ш=\frac{1}{G_ш}=\frac{k_п}{\sqrt{\varkappa_{C_1,\ t_0}\varkappa_{C_2,\ t_0}a_{t_1}a_{t_2}}}. \qquad (22\text{-}2\text{-}28)$$

Из уравнения (22-2-27) с учетом (22-2-4) после несложных преобразований найдем:

$$R_{м,\ t_0}=\frac{k_п\varkappa_{C_1,\ t_0}(a_{t_1}-a_{t_2})}{\left(\varkappa_{C_1,\ t_0}a_{t_2}+\frac{k_п}{R_ш}\right)\left(\varkappa_{C_1,\ t_0}a_{t_1}+\frac{k_п}{R_ш}\right)(a_{м,\ t_1}-a_{м,\ t_2})}. \qquad (22\text{-}2\text{-}29)$$

При расчете схемы температурной компенсации при заданных значениях C_1, C_2, t_1, t_2 и постоянной преобразователя $\kappa_п$ кондуктометра жидкости, градуируемого по NaCl, для измерения электропроводности (солесодержания) водных растворов при малых концентрациях значения величин $\varkappa_{C_1,t_0}$, $\varkappa_{C_2,\ t_0}$, входящих в уравнения (22-2-28) и (22-2-29), определяют по выражению (22-2-18). Значения a_{t_1}, a_{t_2}, $a_{м,t_1}$ и $a_{м,t_2}$ определяют по формулам

$$a_{t_1}=1+2{,}27\cdot 10^{-2}(t_1-18)+0{,}86\cdot 10^{-4}(t_1-18)^2; \qquad (22\text{-}2\text{-}30)$$

$$a_{t_2}=1+2{,}27\cdot 10^{-2}(t_2-18)+0{,}86\cdot 10^{-4}(t_2-18)^2; \qquad (22\text{-}2\text{-}31)$$

$$a_{м,\ t_1}=\frac{1+4{,}26\cdot 10^{-3}t_1}{1+4{,}26\cdot 10^{-3}\cdot 18}; \qquad (22\text{-}2\text{-}32)$$

$$a_{м,\ t_2}=\frac{1+4{,}26\cdot 10^{-3}t_2}{1+4{,}26\cdot 10^{-3}\cdot 18}. \qquad (22\text{-}2\text{-}33)$$

Градуировочная характеристика кондуктометра жидкости при температуре $t_н=t_1=20^\circ$ С рассчитывается по формуле

$$R_{г.\ х}=\left(\frac{\varkappa_{C,\ t_0}a_{t_1}}{k_п}+\frac{1}{R_ш}\right)^{-1}+R_{м,\ t_0}a_{м,\ t_1}+R_л, \qquad (22\text{-}2\text{-}34)$$

где $\varkappa_{C,t_0}$ — электропроводность водного раствора NaCl, соответствующая числовым отметкам шкалы при концентрациях C и температуре $t_0=18^\circ$ С согласно формуле (22-2-18); $R_л$ — сопротивление линии связи (обычно принимают $R_л=5$ Ом).

Рассмотрим схемы измерения электропроводности водных растворов и способы температурной компенсации, осуществляемые включением компенсирующего элемента в измерительную схему кондуктометра жидкости. Для измерения электропроводности (кон-

центрации) водных растворов электродными преобразователями широко применяют вторичные приборы с мостовой измерительной схемой, выполняемые на базе автоматических уравновешенных мостов (гл. 5).

На рис. 22-2-8 приведена принципиальная схема кондуктометра жидкости, состоящего из электродного преобразователя *ЭП* и автоматического уравновешенного моста. На схеме приняты следующие обозначения: R_1, R_2 и R_3 — постоянные резисторы плеч моста; $R_{пр}$ — приведенное сопротивление реохорда; $R_б$ — балластный резистор для ограничения тока; $R_л$ — резистор для подгонки сопротивления проводов до заданного значения; R_C — сопротивление раствора между электродами преобразователя *ЭП* (рис. 22-2-2,*б*); R_0 — резистор с параллельно включенным сопротивлением R_C (R_0 и R_C являются четвертым плечом моста); *РД* — асинхронный реверсивный двигатель; *СД* — синхронный двигатель. Резисторы R_1, R_2, R_3, $R_б$, R_0 и $R_л$ выполнены из манганиновой проволоки. Резистор R_0 служит для установления необходимого диапазона изменения сопротивления $R_x = (R_C + R_л) R_0 (R_C + R_л + R_0)^{-1}$ при измерении электропроводности раствора от начального до конечного значения шкалы, что позволяет использовать без изменений реохорда и усилителя серийно выпускаемые автоматические уравновешенные мосты КСМ2.

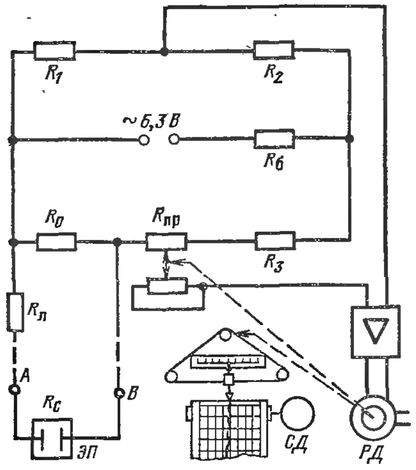


Рис. 22-2-8. Принципиальная схема кондуктометра жидкости с использованием электродного преобразователя (рис. 22-2-2, *б*).

Рассмотренная мостовая измерительная схема вторичного прибора кондуктометра жидкости может быть использована также для измерения электропроводности водных растворов электродным преобразователем с температурной компенсацией (см. рис. 22-2-6), если его присоединить к зажимам *A* и *B* вместо преобразователя *ЭП*. Кондуктометры жидкости с таким электродным преобразователем, изготовляемые ЦЛЭМ Тулэнерго, применяют на ТЭС для измерения электропроводности химически обессоленной воды. В этих кондуктометрах жидкости используются электродные преобразователи с температурной компенсацией от 15 до 35° С проточного и погружного типов. Приборы имеют диапазон измерения удельной электропроводности от 0,04 до 5,0 мкСм/см при 20° С.

Рассмотрим способ температурной компенсации с помощью терморезистора, включаемого в измерительную схему автоматического

уравновешенного моста кондуктометра жидкости (рис. 22-2-9). Здесь электродный преобразователь *ЭП* включен в измерительную мостовую схему вторичного прибора, так же как на рис. 22-2-8. При этом приведенное сопротивление преобразователя $R_x = (R_C + R_л) R_0 (R_C + R_л + R_0)^{-1}$ и терморезистор $R_т$ с шунтом R_1, включенным в смежные плечи моста, обладают отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Следует отметить, что для терморезистора зависимость $R_т = f(t)$, так же как и для R_C, нелинейна (гл. 5).

При измерении электропроводности терморезистор имеет ту же температуру, что и анализируемый раствор, так как он обычно монтируется внутри корпуса преобразователя. Точность температурной компенсации будет определяться степенью согласованности температурных коэффициентов терморезистора $R_т$ с шунтом и приведенного сопротивления преобразователя R_x.

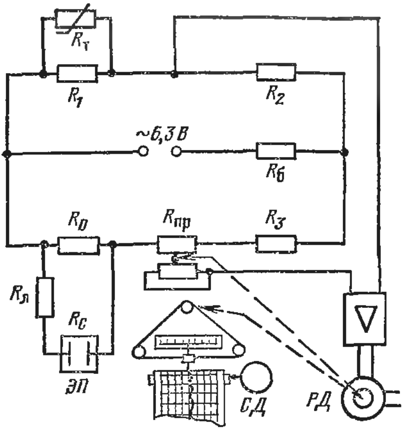


Рис. 22-2-9. Принципиальная схема кондуктометра жидкости с использованием терморезистора для температурной компенсации.

Рассмотренная температурная компенсация с помощью терморезистора, включенного в измерительную мостовую схему, используется в применяемых кондуктометрических анализаторах жидкости.

Температурная компенсация может быть также осуществлена с помощью дополнительного электродного преобразователя, который заполнен водным раствором, имеющим температурный коэффициент сопротивления, близкий температурному коэффициенту анализируемого раствора [98]. В этом случае рабочий и компенсирующий преобразователи включают в смежные плечи измерительной схемы моста. При этом компенсирующий преобразователь омывается снаружи анализируемым раствором и имеет с ним одинаковую температуру. Этот способ температурной компенсации не получил широкого распространения, так как свойства раствора в компенсационном преобразователе со временем изменяются.

Автоматические уравновешенные мосты, предназначенные для работы в комплекте с электродными преобразователями, могут быть снабжены дополнительным устройством для сигнализации (регулирования) предельных значений электропроводности водных растворов электролитов.

Кроме рассмотренных анализаторов жидкости с электродными преобразователями выпускаются кондуктометрический анализатор

АК класса точности 5, разработанный СКБ АП, с выходным сигналом постоянного тока 0—5 мА. Этот кондуктометрический анализатор, снабжаемый фильтром, заполненным катионитом марки КУ-2, предназначен для измерения удельной электропроводности водных растворов при температуре 30—40° С и наличии в них минеральных примесей, аммиака и гидразина. В качестве вторичного прибора применяется автоматический миллиамперметр КСУ2 с диапазонами измерений 0—1, 0—10 и 0—100 мкСм/см.

22-3. Кондуктометры жидкости с дегазацией и обогащением пробы

При измерении малых концентраций солей, растворенных в перегретом водяном паре, питательной воде парогенераторов и конденсате турбин мощных энергетических блоков, необходимо, как отмечалось выше, учитывать влияние на показания кондуктометров жидкости (солемеров) растворенных в анализируемой пробе газов и особенно аммиака. Для уменьшения влияния растворенных газов в анализируемой пробе на результаты измерения солесодержания производят дегазацию и обогащение пробы [97, 100, 101]. Этот принцип используется в кондуктометрах жидкости (солемерах) с малогабаритными концентраторами типа СППМ, СПВМ и СКТМ, разработанных ЦКТИ [101]. Солемеры ЦКТИ предназначены для непрерывного автоматического измерения условного солесодержания в интервале 0—200 мкг/кг перегретого пара (СППМ), питательной воды (СПВМ) прямоточных парогенераторов и конденсата турбин (СКТМ) мощных энергетических блоков.

Пределы допускаемой основной погрешности комплекта солемера в нормальных эксплуатационных условиях не превышают ±10% диапазона измерения.

При применении солемеров с малогабаритными концентраторами необходимо иметь в виду, что их показания зависят от содержания гидразина в пробе [101].

22-4. Безэлектродные кондуктометрические анализаторы жидкости

Кондуктометрические анализаторы жидкости, безэлектродные преобразователи которых питают переменным током частотой 50 Гц, принято называть низкочастотными безэлектродными кондуктометрами жидкости. Они получили широкое применение в различных отраслях промышленности для измерения электропроводности водных растворов электролитов. На электростанциях низкочастотные кондуктометры жидкости используются для контроля концентраций регенерационных растворов кислоты, щелочи и соли, а также для измерения электропроводности химически обессоленной воды. Достоинством низкочастотных кондуктометров жидкости является то, что их первичный преобразователь не имеет электродов, которые

могут подвергаться поляризации и загрязнению. Это повышает надежность работы кондуктометров жидкости и положительно сказывается на точности измерения. Низкочастотные безэлектродные кондуктометры жидкости позволяют измерять электропроводность как чистых, так и загрязненных водных растворов кислот, щелочей и солей.

Безэлектродные кондуктометры жидкости не могут быть использованы для контроля качества пара, конденсата турбин и питательной воды парогенераторов, а также других водных растворов, аналогичных по электропроводности конденсату пара.

Наряду с низкочастотными безэлектродными кондуктометрами жидкости существуют высокочастотные бесконтактные приборы для измерения электропроводности водных растворов [86], однако они не применяются на электростанциях и ниже рассматриваться не будут.

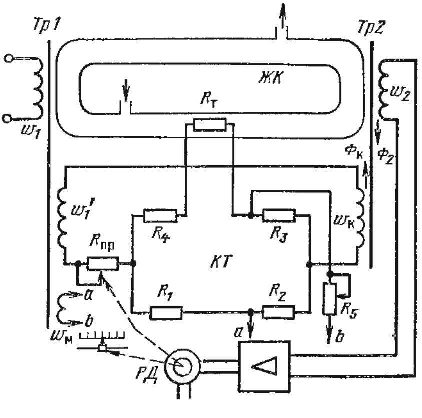


Рис. 22-4-1. Принципиальная схема низкочастотного безэлектродного кондуктометра жидкости.

Рассмотрим упрощенную принципиальную схему низкочастотного безэлектродного кондуктометра жидкости, показанную на рис. 22-4-1. Индуктивный безэлектродный первичный преобразователь кондуктометра состоит из силового *Тр1* и измерительного *Тр2* трансформаторов, связанных между собой электрически жидкостным контуром *ЖК*. Этот контур выполняет функции вторичной обмотки силового трансформатора *Тр1* и первичной обмотки измерительного трансформатора *Тр2* и представляет собой замкнутую трубу из изоляционного материала, через которую протекает анализируемая жидкость.

Для уменьшения влияния колебаний напряжения и частоты питающей сети предусмотрен компенсационный контур, состоящий из обмоток w_1', $w_к$ и реохорда $R_{пр}$. Для автоматической коррекции влияния температуры анализируемой жидкости на показания вторичного прибора кондуктометра используется компенсатор температуры *КТ*, включенный в цепь компенсационного контура последовательно с реохордом $R_{пр}$. Компенсатор температуры представляет собой мостовую схему, работающую в неравновесном режиме. В одно плечо этого моста включены терморезистор $R_т$ (например, типа ММТ), помещенный в жидкостный контур, и резистор R_4 из манганиновой проволоки. Резисторы R_1, R_2 и R_3, образующие остальные три плеча моста, выполнены из манганиновой проволоки. Мост компенсатора температуры питается переменным напряже-

нием от вторичной обмотки трансформатора *Тр1*. Резистор R_5 служит для регулировки тока.

Переменный ток в обмотке w_1 силового трансформатора создает в его сердечнике переменный магнитный поток, который индуктирует э. д. с. $E_ж$ в жидкостном контуре. Если обозначить электрическое сопротивление жидкостного контура через R_C, то ток в нем определится выражением

$$I_ж = \frac{E_ж}{R_C}, \qquad (22\text{-}4\text{-}1)$$

которое с учетом уравнения (22-2-3) принимает вид:

$$I_ж = \frac{\varkappa_C E_ж}{k_п}.$$

Из этого выражения следует, что сила тока $I_ж$ пропорциональна удельной электропроводности анализируемой жидкости $\varkappa_C$. Ток в жидкостном контуре, являющемся одновременно первичной обмоткой измерительного трансформатора *Тр2*, создает в его сердечнике переменный магнитный поток, который наводит во вторичной обмотке w_2 э. д. с. E_2, пропорциональную $\varkappa_C$. Выходной сигнал с вторичной обмотки w_2 подается на вход усилителя вторичного прибора, где усиливается до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя *РД*. Вал реверсивного двигателя, кинематически связанный с движком реохорда $R_{пр}$ и кареткой, перемещает их до тех пор, пока ток в обмотке $w_к$ компенсационного контура не создаст в сердечнике трансформатора *Тр2* переменный магнитный поток $\Phi_к$, равный и противоположный магнитному потоку Φ_2, создаваемому в том же сердечнике током $I_ж$. В этом случае сигнал на входе усилителя уменьшится практически до нуля, ротор реверсивного двигателя остановится, а движок реохорда и каретки с указателем займет положение, соответствующее измеряемой электропроводности $\varkappa_C$ и концентрации C анализируемой жидкости. Значение измеряемой электропроводности анализируемой жидкости при этом определяется выражением

$$\varkappa_C = \kappa \frac{k_п}{mR_{пр} + R_{пм}},$$

где κ — постоянный коэффициент; $m = R'_{пр}/R_{пр}$, здесь $R'_{пр}$ — текущее значение сопротивления реохорда; $R_{пм}$ — приведенное сопротивление моста компенсатора температуры, соответствующее 20° С.

При повышении температуры анализируемой жидкости сопротивление R_C уменьшается, и вследствие этого ток в жидкостном контуре увеличивается на $\Delta I_ж$, а вместе с тем возрастет на $\Delta\Phi_2$ и магнитный поток Φ_2. При этом одновременно уменьшается сопротивление терморезистора $R_т$ компенсатора температуры, что приводит к разбалансу моста и к возникновению в его диагонали тока $\Delta I_м$. Вследствие этого при неизменном положении движка реохорда ток в компенсационном контуре увеличится на значение $\Delta I_м$, а следо-

вательно, возрастет на $\Delta\Phi_к$ и магнитный поток $\Phi_к$. При равенстве значений $\Delta\Phi_2 \approx \Delta\Phi_к$ будет обеспечена температурная компенсация с некоторой погрешностью. В выпускаемых низкочастотных кондуктометрах жидкости при отклонении температуры анализируемой жидкости на $+15°$ С от среднего значения рабочего интервала температур изменение показаний вторичного прибора составляет 2—2,5% верхнего предела измерения, что не удовлетворяет современным требованиям к точности измерения электропроводности и вызывает необходимость усовершенствования температурной компенсации.

Вторичные приборы низкочастотных безэлектродных кондуктометров жидкости выполняют на базе автоматических уравновешенных мостов КСМ2, КСМ3 или других типов. Вторичные приборы могут быть снабжены контактным устройством для сигнализации или регулирования.

Из числа выпускаемых низкочастотных безэлектродных кондуктометров жидкости, разработанных СКБ АП, на электростанциях применяют кондуктометры жидкости типа КК-8 и КК-9 для контроля концентраций регенерационных растворов. Кондуктометр жидкости КК-8 имеет безэлектродный преобразователь проточного типа, кондуктометр КК-9 — погружного типа. Эти кондуктометры жидкости используются также и в других отраслях промышленности для измерения электропроводности чистых и загрязненных водных растворов кислот, щелочей и солей. Кондуктометры типа КК рассчитаны на диапазон измерения удельной электропроводности 0,01—1 $См \cdot см^{-1}$ с двумя поддиапазонами: 0,01—0,1 и 0,1—1 $См \cdot см^{-1}$. Предел допускаемой основной погрешности этих кондуктометров жидкости — 2,5%.

Технические характеристики низкочастотных кондуктометров жидкости других типов приведены в [75].

22-5. Анализаторы для определения растворенного в воде кислорода

В целях обеспечения надежной эксплуатации мощных блоков с высокими и закритическими параметрами пара введены строгие ограничения на допустимое содержание растворенного кислорода в питательной воде. Известно, что присутствие растворенного кислорода в питательной воде вызывает коррозию металла внутренних поверхностей пароводяного тракта парогенераторов. Для уменьшения коррозии металла необходимо ограничивать содержание растворенного кислорода в питательной воде до 7—10 мкг/кг. Повышение надежности эксплуатации мощных парогенераторов в известной степени связано с возможностями автоматического точного и непрерывного измерения микроконцентраций растворенного в питательной воде кислорода.

В настоящее время из числа известных применяемых для автоматического измерения микроконцентраций растворенного в воде ки-

слорода методов получили распространение фотоколориметрические, электрохимические и кондуктометрические.

Фотоколориметрические методы основаны на измерении оптической плотности анализируемой воды, изменяющейся за счет окрашенных соединений, которые образуются в результате взаимодействия растворенного в воде кислорода с вводимым в пробу реагентом. Интенсивность окраски зависит от концентрации растворенного в воде кислорода. В Советском Союзе в качестве индикаторов получили распространение индигокармин и сафранин.

Преобразование измеряемой величины (кислородосодержания) в изменение электрического сопротивления в фотоколориметрических анализаторах осуществляется с помощью оптического блока, показанного на рис. 22-5-1. Здесь *1* — источник света (осветитель); *2* и *5* — линзы; *3* — прозрачная кювета; *4* — светофильтр; *6* — контрольный светофильтр для подстройки фиксированной отметки шкалы вторичного прибора; *7* — фоторезистор.

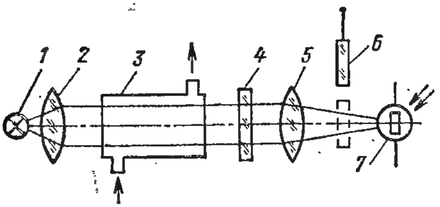


Рис. 22-5-1. Принципиальная схема фотоколориметрического анализатора измерения кислорода в воде.

Анализируемая вода поступает в кювету *3*. В эту же кювету автоматически вводится определенный объем реактива. Степень ослабления светового потока, проходящего через кювету от источника *1*, зависит от интенсивности окраски пробы, определяющейся концентрацией растворенного кислорода. Таким образом, световой поток, падающий на фоторезистор *7*, а следовательно, и электрическое сопротивление последнего находятся в однозначной зависимости от измеряемой величины — кислородосодержания. Для автоматического измерения значения электрического сопротивления используется мостовая измерительная схема.

Основным недостатком автоматических фотоколориметрических анализаторов, предназначенных для измерения растворенного в воде кислорода, следует считать то, что они являются приборами дискретного действия. Возможно осуществление непрерывных измерений, но это связано со снижением точности и повышенным расходом реактива.

Электрохимические методы измерения основаны на применении электрохимических чувствительных элементов. Такой элемент состоит из двух электродов, помещенных в буферный водный раствор. Раствором может являться сама анализируемая вода. При отсутствии в среде, где расположены электроды, растворенного кислорода происходит процесс поляризации электродов или за счет электрохимических процессов, протекающих на поверхности электродов, или приложенным внешним напряжением. При полной поляризации цепь электродов разомкнута, так как поверхность катода (отрица-

тельно заряженного электрода) покрыта пленкой молекулярного водорода и ток в цепи отсутствует. Кислород является активным деполяризатором. При введении кислорода в раствор происходит частичная деполяризация поверхности катода, что приводит к возникновению в цепи электродов электрического тока, значение которого пропорционально в области малых концентраций содержанию кислорода и определяется уравнением

$$I = \frac{S_к DnFC}{\delta}, \qquad (22\text{-}5\text{-}1)$$

где $S_к$ — поверхность катода; D — коэффициент диффузии; n — валентность ионов кислорода; F — число Фарадея; C — концентрация кислорода; δ — толщина диффузионного слоя.

Существуют электрохимические анализаторы с чувствительными элементами проточного типа. Буферным раствором в этом случае является анализируемая вода. Применение такого принципа возможно только в случае измерений кислородосодержания в воде высокой степени чистоты, когда вода не содержит примесей, могущих исказить результат измерения.

Влияние примесей в питательной воде полностью исключается в электрохимических анализаторах с вспомогательным газовым контуром.

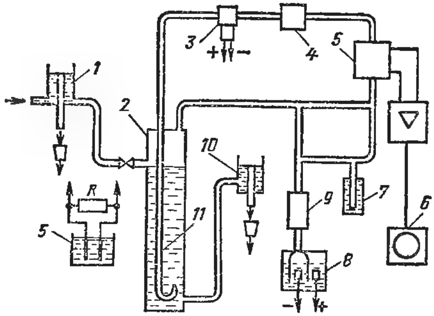


Рис. 22-5-2. Принципиальная схема электрохимического анализатора фирмы «Кембридж» для измерения кислорода в воде.

В качестве примера рассмотрим электрохимический анализатор, снабженный вспомогательным газовым контуром, фирмы «Кембридж» (Англия). Эти анализаторы применяются в СССР на ТЭС для измерения растворенного в питательной воде кислорода.

На рис. 22-5-2 приведена принципиальная схема электрохимического анализатора фирмы «Кембридж». Здесь *1* — напорная колонка; *2* — приемная колонка; *3* — электролизер, позволяющий дозировать в газовый контур известные количества чистого кислорода при проверке прибора; *4* — газовый насос; *5* — измерительная ячейка, которая состоит из двух электродов (золотого и платинового), погруженных в буферный раствор с pH = 9,2 или 6,4, в зависимости от диапазона измерения кислорода; *6* — автоматический потенциометр, на вход которого подается сигнал измерительной ячейки, предварительно усиленный усилителем; *7* — барботажный клапан; *8* — электролизер, заполненный водным раствором едкого кали, для получения водорода; *9* — печь с палладиевым катализатором для очистки водорода, поступающего в газовый контур от возможных примесей кислорода; *10* — сосуд для поддержания постоянного уровня воды в приемной колонке; *11* — трубка для подачи водорода в приемную колонку.

Анализируемая предварительно охлажденная вода поступает через напорную колонку в приемную колонку и вытекает из нее через сосуд *10* в сливную воронку. Одновременно в приемную колонку насосом, установленным в замкнутом контуре, подается водород. Водород проходит через слой воды в виде мелких пузырьков. Растворенный кислород выделяется из воды и переходит в атмосферу водорода. В состоянии динамического равновесия концентрация кислорода в водо-

родной среде однозначно определяется кислородосодержанием воды. Газовая смесь из приемной колонки поступает в измерительную ячейку. Здесь происходит обратный цикл массообмена: газы растворяются в буферном растворе.

При наличии в газовой смеси кислорода происходит частичная деполяризация поверхности золотого катода, приводящая к возникновению тока в цепи электродов. Восполнение потерь водорода осуществляется электролизером *8*. Давление водорода в контуре несколько выше атмосферного и поддерживается на постоянном значении барботажным клапаном *7*.

Выходной сигнал измерительной ячейки в виде напряжения, снимаемого с резистора R, подается на усилитель, а затем на вход автоматического потенциометра.

Кондуктометрический метод измерения микроконцентраций растворенного в воде кислорода находит применение в СССР и в ряде зарубежных стран. Действие кондуктометрических анализаторов основано на использовании необратимых в условиях прибора реакциях растворенного в воде кислорода с тем или иным реагентом, сопровождающихся изменением электропроводности анализируемой воды. Применяемый реагент должен быстро и полно взаимодействовать с растворенным в воде кислородом с образованием сильного электролита и не вступать в реакции с водой и ее примесями. Последнее требование предъявляется и к веществу, образующемуся в результате реакции. Большое значение имеют также возможность получения реагента в чистом виде и его стоимость. Полностью перечисленным требованиям не удовлетворяет ни одно из известных веществ. Свойства, наиболее близкие к оптимальным, имеют металлический таллий и в меньшей степени газообразная окись азота.

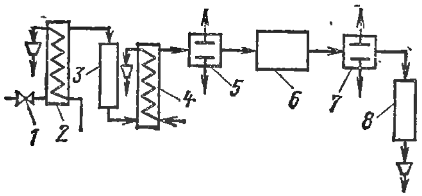


Рис. 22-5-3. Принципиальная схема кондуктометрического анализатора для измерения кислорода в воде.

Следует отметить, что при использовании в кондуктометрическом анализаторе в качестве реагента металлического таллия обеспечивается более простая конструкция прибора, но наряду с этим необходимо учитывать эксплуатационные неудобства, обусловленные токсичностью таллия и ионов таллия, а также относительно высокую стоимость его. Анализаторы, использующие в качестве реагента окись азота, имеют более сложную конструкцию.

Принципиальная схема кондуктометрического анализатора для измерения микроконцентраций растворенного в воде кислорода показана на рис. 22-5-3, где приняты следующие обозначения: *1* — вентиль запорный; *2* — холодильник для первоначального охлаждения пробы воды; *3* — фильтр для обессоливания анализируемой воды, который заполняется ионообменными смолами (50% — анионит марки АВ-17 и 50% — катионит КУ-2); *4* — дополнительный холодильник для охлаждения пробы воды; *5* — электродный преобразователь для измерения начальной электропроводности воды;

6 — патрон из полиэтилена, заполненный мелко нарезанным металлическим таллием; *7* — электродный преобразователь для измерения удельной электропроводности воды на выходе из патрона; *8* — фильтр для очистки воды от ионов таллия.

Анализируемая проба воды поступает через холодильник на вход фильтра *3*. После фильтра через второй холодильник вода проходит через первый электродный преобразователь *5* и далее в патрон с металлическим таллием. После патрона проба воды поступает во второй электродный преобразователь *7*, а затем проходит фильтр и сливается в дренаж.

При взаимодействии кислорода, содержащегося в воде, с таллием он окисляет его до одновалентной гидроокиси таллия:

$$H_2O + 2Tl + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2TlOH.$$

Получающаяся в результате реакции окисления гидроокись таллия хорошо растворяется в воде и быстро переходит в раствор в виде ионов таллия и гидроокиси. Гидроокись таллия является сильным электролитом, который повышает удельную электропроводность раствора на значение, пропорциональное содержанию растворенного в воде кислорода.

Рассмотренная принципиальная схема кондуктометрического анализатора используется в разработанных СКБ АП анализаторах АК-П и АК-300, предназначенных для измерения концентрации растворенного кислорода в питательной воде энергетических установок на ТЭС и АЭС.

В кондуктометрическом кислородомере АК-300 выходное напряжение измерительной схемы подается на вход усилителя для усиления и преобразования в выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА. В качестве вторичного прибора используется миллиамперметр КСУ2. Кондуктометрический анализатор АК-300 выпускается класса точности 6 с диапазоном измерения 0—30 мкг/л O_2. Параметры анализируемой воды: давление 5 кгс/см^2 (0,5 МПа), температура 30 ± 5°С, расход 3 л/ч. Питание от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Потребляемая мощность 50 Вт.

22-6. Анализаторы для определения растворенного в воде и паре водорода

В настоящее время в энергетике уделяют большое внимание методу контроля скорости коррозии металла внутренних поверхностей пароводяного тракта парогенераторов, основанному на определении в питательной воде и паре содержания водорода, являющегося неизбежным продуктом такой коррозии. Применяемый лабораторный метод анализа требует много времени, не может отражать динамики процессов и не обладает необходимой точностью. Если учесть, что скорость коррозии металла определяется совокупностью факторов, а именно водным и температурным режимами,

то только автоматический непрерывный контроль за водородом в воде и паре дает возможность оперативно контролировать правильность режима эксплуатации парогенератора. Надежный непрерывный контроль за содержанием водорода в воде и паре позволит решить стоящую перед энергетиками задачу повышения надежности и продления срока службы парогенераторов.

Известно, что растворимость данного газа в воде (конденсате пара) зависит от парциального давления этого газа в находящейся над водой газовой среде и не зависит от состава газов этой среды. Следовательно, если контролируемую воду (конденсат), содержащую растворенный водород, поместить в атмосферу кислорода, то водород будет выделяться из воды до тех пор, пока не наступит состояние равновесия. При этом чем больше водорода содержится в воде, тем большее количество его будет выделяться в окружающую кислородную среду. При уменьшении содержания водорода в воде часть его, ранее выделившаяся в кислородную среду, будет снова растворяться в воде до наступления нового состояния равновесия.

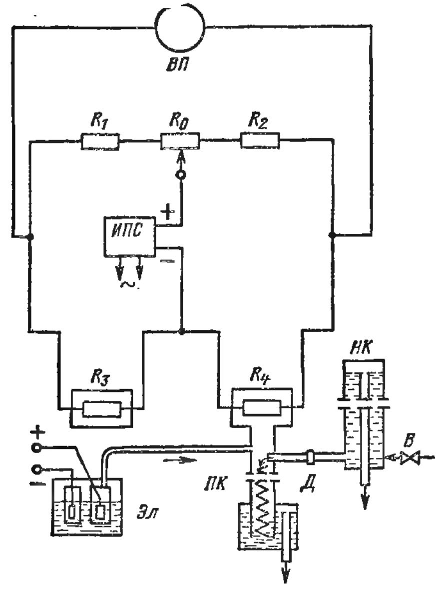


Рис. 22-6-1. Принципиальная схема термокондуктометрического анализатора для измерения водорода в паре или воде.

Таким образом, по концентрации водорода в кислородной среде можно судить о содержании водорода, растворенного в воде (конденсате пара), используя для этой цели метод измерения теплопроводности газовой смеси, состоящей из водорода и кислорода, по отношению к кислороду. Приборы, основанные на измерении теплопроводности газовой смеси, принято называть термокондуктометрическими анализаторами. Они получили широкое распространение в ряде зарубежных стран.

На рис. 22-6-1 приведена принципиальная схема термокондуктометрического анализатора для определения содержания водорода в паре или питательной воде парогенераторов. Анализатор состоит из следующих устройств и элементов: приемного преобразователя, использующего измерительную схему неуравновешенного моста; вторичного прибора *ВП*, например, автоматического потенциометра; стабилизированного источника питания *ИПС*; электролизера *Эл*, заполненного водным раствором едкого кали, для получения чи-

стого кислорода; приемной колонки *ПК* с водяным затвором, в которую поступает контролируемая проба воды или конденсата пара; напорной колонки *НК*, которая поддерживает постоянство давления перед приемной колонкой преобразователя; диафрагмы *Д* для стабилизации расхода пробы. Небольшое избыточное давление кислорода в приемной колонке поддерживается постоянным с помощью барботажного клапана, который на рис. 22-6-1 не показан.

Резисторы мостовой схемы R_1, R_0 и R_2 выполнены из манганиновой проволоки. Плечи моста R_3 и R_4, являющиеся чувствительными элементами, изготовляются из тонкой остеклованной платиновой проволоки диаметром примерно 0,04 мм. Чувствительный элемент R_3 помещен в герметически закрытую камеру, заполненную чистым кислородом (сравнительным газом). Чувствительный элемент R_4 помещен в рабочую камеру, которая с помощью канала соединена с верхней частью приемной колонки. Таким образом, рабочая камера имеет диффузионный подвод газовой смеси. Для увеличения площади соприкосновения пробы конденсата (воды) с кислородной средой в приемной колонке установлена никелевая спираль.

Температура стенок камер чувствительных элементов (R_3, R_4) преобразователя должна быть одинакова. Для этой цели камеры выполняют массивными, из металла с хорошей теплопроводностью. В корпусе камер делают канал, через который поступает проба воды из напорной колонки в приемную колонку.

Для снижения давления и температуры анализируемой пробы анализаторы снабжаются дополнительными устройствами. Например, проба пара для анализа, отобранная из паропровода, предварительно поступает в холодильник через дроссель, обеспечивающий снижение давления и необходимый расход пара. Из холодильника конденсат пара, имеющий температуру около 30°С, поступает в напорную колонку преобразователя.

Кислород из электролизера, как было сказано выше, непрерывно подается в приемную колонку *ПК*. Одновременно в эту колонку поступает анализируемая проба конденсата или воды и удаляется через водяной затвор в сливную воронку. При этом конденсат (вода) соприкасается со средой кислорода и выделяет растворенный водород. Эта газовая смесь, состоящая из кислорода и водорода, поступает в рабочую камеру с чувствительным элементом R_4. Вследствие этого изменяются условия теплоотдачи от чувствительного элемента R_4, нагреваемого током, к стенкам камеры, так как теплопроводность бинарной газовой смеси иная, чем сравнительного газа (кислорода). В силу этих обстоятельств температура чувствительного элемента R_4 понижается, а следовательно, уменьшается его сопротивление. При этом на вершинах измерительной диагонали моста из-за нарушения его равновесия появится напряжение и указатель вторичного прибора займет положение, соответствующее значению сопротивления чувствительного элемента R_4, а следовательно, и содержанию водорода в анализируемой пробе.

Шкалу вторичного прибора анализаторов, применяемых для определения растворенного в воде и паре водорода, градуируют в микрограммах на литр (мкг/л) или микрограммах на килограмм (мкг/кг).

Рассмотренная принципиальная схема прибора используется в анализаторе для определения растворенного в воде водорода, выпускаемом фирмой «Кембридж» (Англия). Диапазон измерения водорода — от 0 до 20 мкг/кг (или мкг/л). Анализаторы фирмы «Кембридж» применяются в СССР на ряде ТЭС для определения содержания водорода в паре парогенераторов. Пределы допускаемой основной погрешности анализатора не превышают ±5% верхнего предела.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П1-4-1

Значения t_P и $\frac{t_P}{\sqrt{n}}$ в зависимости от доверительной вероятности P и $k=n-1$

(значения t_P удовлетворяют равенству $2\int_0^{t_P} \sigma(t,\ k)\,dt = p$)

P	0,683		0,90		0,95		0,98		0,99		0,997	
k	t_P	$\frac{t_P}{\sqrt{n}}$	t_P	$\frac{t_P}{\sqrt{n}}$	t_P	$\frac{t_P}{\sqrt{n}}$	t_P	$\frac{t_P}{\sqrt{n}}$	t_P	$\frac{t_P}{\sqrt{n}}$	t_P	$\frac{t_P}{\sqrt{n}}$
1	1,8	1,3	6,31	4,48	12,71	9,0	31,8	22,5	63,7	45,0	235	166
2	1,32	0,76	2,92	1,69	4,30	2,5	6,96	4,01	9,92	5,7	19,2	11,1
3	1,20	0,60	2,35	1,18	3,18	1,59	4,54	2,27	5,84	2,9	9,2	4,6
4	1,15	0,51	2,13	0,95	2,78	1,24	3,75	1,67	4,60	2,1	6,6	3,0
5	1,11	0,45	2,02	0,82	2,57	1,05	3,36	1,37	4,03	1,6	5,5	2,24
6	1,09	0,41	1,94	0,73	2,45	0,93	3,14	1,19	3,71	1,4	4,9	1,85
7	1,08	0,38	1,90	0,67	2,36	0,84	3,00	1,06	3,50	1,24	4,5	1,59
8	1,07	0,36	1,86	0,62	2,31	0,77	2,90	0,97	3,36	1,12	4,3	1,43
9	1,06	0,34	1,83	0,58	2,26	0,72	2,82	0,89	3,25	1,03	4,1	1,29
10	1,05	0,32	1,81	0,55	2,23	0,67	2,76	0,83	3,17	0,96	3,9	1,18
11	1,05	0,30	1,80	0,52	2,20	0,65	2,72	0,79	3,11	0,90	3,8	1,10
12	1,05	0,29	1,78	0,49	2,18	0,60	2,68	0,74	3,06	0,85	3,8	1,05
13	1,04	0,28	1,77	0,47	2,16	0,58	2,65	0,71	3,01	0,80	3,7	0,99
14	1,04	0,27	1,76	0,45	2,14	0,55	2,62	0,68	2,98	0,77	3,7	0,96
15	1,04	0,26	1,75	0,44	2,13	0,53	2,60	0,65	2,95	0,74	3,6	0,90
16	1,04	0,25	1,75	0,42	2,12	0,51	2,58	0,63	2,92	0,71	3,6	0,87
17	1,03	0,24	1,74	0,41	2,11	0,50	2,57	0,61	2,90	0,68	3,5	0,82
18	1,03	0,24	1,73	0,40	2,10	0,48	2,55	0,59	2,88	0,66	3,5	0,80
19	1,03	0,23	1,73	0,39	2,09	0,47	2,54	0,57	2,86	0,64	3,4	0,77
20	1,03	0,23	1,72	0,38	2,09	0,47	2,53	0,55	2,84	0,62	3,4	0,76
30	1,02	0,19	1,70	0,31	2,04	0,37	2,46	0,44	2,75	0,49	3,3	0,60
40	1,01	0,16	1,68	0,26	2,02	0,32	2,42	0,38	2,70	0,42	3,2	0,51
50	1,01	0,14	1,68	0,24	2,01	0,28	2,41	0,34	2,68	0,38	3,2	0,45
100	1,00	0,10	1,66	0,17	1,98	0,20	2,38	0,24	2,63	0,26	3,1	0,31
200	1,00	0,07	1,65	0,12	1,97	0,14	2,34	0,16	2,60	0,18	3,04	0,22
∞	1,00	0	1,645	0	1,96	0	2,33	0	2,58	0	3,0	0

Таблица П1-4-2

Значения κ_1 и κ_2, отвечающие вероятностям P, распадающимся на $P_1=\frac{1-P}{2}$ и $P_2=\frac{1+P}{2}$, и $\kappa=n-1$

P	0,90		0,95		0,98		0,99	
	P_1=0,05	P_2=0,95	P_1=0,025	P_2=0,975	P_1=0,01	P_2=0,99	P_1=0,005	P_2=0,995
κ	κ_1	κ_2	κ_1	κ_2	κ_1	κ_2	κ_1	κ_2
1	0,510	15,952	0,446	31,911	0,388	79,809	0,356	159,516
2	0,578	4,406	0,520	6,287	0,466	9,975	0,434	14,142
3	0,620	2,919	0,566	3,727	0,515	5,108	0,484	6,468
4	0,649	2,372	0,600	2,875	0,548	3,670	0,518	4,396

P	0,90		0,95		0,98		0,99	
	$P_1=0{,}05$	$P_2=0{,}95$	$P_1=0{,}025$	$P_2=0{,}975$	$P_1=0{,}01$	$P_2=0{,}99$	$P_1=0{,}005$	$P_2=0{,}995$
к	$к_1$	$к_2$	$к_1$	$к_2$	$к_1$	$к_2$	$к_1$	$к_2$
5	0,671	2,085	0,625	2,453	0,575	3,004	0,547	3,484
6	0,690	1,913	0,645	2,200	0,598	2,623	0,569	2,979
7	0,704	1,796	0,661	2,035	0,615	2,376	0,587	2,660
8	0,718	1,712	0,676	1,916	0,631	2,202	0,603	2,443
9	0,730	1,644	0,688	1,826	0,644	2,075	0,618	2,281
10	0,739	1,593	0,698	1,754	0,656	1,976	0,630	2,152
11	0,747	1,551	0,709	1,697	0,667	1,899	0,641	2,057
12	0,756	1,515	0,718	1,651	0,677	1,833	0,651	1,977
13	0,762	1,486	0,725	1,611	0,685	1,778	0,660	1,908
14	0,768	1,460	0,732	1,577	0,694	1,733	0,669	1,855
15	0,774	1,437	0,738	1,548	0,700	1,694	0,676	1,806
16	0,780	1,418	0,745	1,522	0,707	1,659	0,683	1,764
17	0,785	1,400	0,750	1,500	0,713	1,628	0,690	1,727
18	0,789	1,385	0,756	1,479	0,719	1,602	0,696	1,696
19	0,794	1,372	0,760	1,460	0,724	1,578	0,702	1,667
20	0,798	1,354	0,765	1,444	0,729	1,556	0,707	1,641
21	0,801	1,345	0,769	1,428	0,735	1,536	0,712	1,617
22	0,806	1,337	0,773	1,414	0,739	1,518	0,717	1,596
23	0,808	1,325	0,777	1,402	0,744	1,502	0,721	1,576
24	0,812	1,319	0,780	1,391	0,747	1,484	0,725	1,558
25	0,814	1,308	0,785	1,381	0,751	1,474	0,730	1,543
26	0,818	1,299	0,788	1,373	0,755	1,460	0,734	1,524
27	0,820	1,291	0,790	1,360	0,758	1,447	0,738	1,513
28	0,823	1,287	0,793	1,353	0,761	1,435	0,741	1,497
29	0,825	1,280	0,797	1,346	0,765	1,424	0,745	1,488
30	0,828	1,273	0,799	1,336	0,768	1,414	0,747	1,474
35	0,838	1,247	0,811	1,303	0,782	1,375	0,762	1,426
40	0,847	1,228	0,821	1,280	0,792	1,342	0,774	1,390
45	0,854	1,213	0,830	1,259	0,802	1,318	0,784	1,361
50	0,860	1,199	0,837	1,242	0,810	1,297	0,793	1,336
75	0,883	1,156	0,862	1,191	0,840	1,231	0,824	1,260
100	0,897	1,133	0,878	1,161	0,859	1,194	0,844	1,219

Таблица П4-7-1

Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа ТПП стандартной градуировки ПП при температуре свободных концов 0°С. ГОСТ 3044-74

Температура рабочего конца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	мВ									
0	0,000	0,006	0,011	0,017	0,022	0,028	0,033	0,039	0,044	0,050
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,095	0,101	0,107
20	0,112	0,118	0,124	0,131	0,137	0,143	0,149	0,155	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,186	0,192	0,198	0,204	0,210	0,216	0,222	0,228
40	0,234	0,241	0,247	0,254	0,260	0,267	0,273	0,280	0,286	0,293
50	0,299	0,306	0,312	0,319	0,325	0,332	0,338	0,345	0,351	0,358
60	0,364	0,371	0,378	0,385	0,392	0,398	0,405	0,412	0,418	0,425
70	0,432	0,439	0,446	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,487	0,493
80	0,500	0,507	0,515	0,522	0,529	0,536	0,543	0,550	0,558	0,564
90	0,571	0,579	0,586	0,593	0,600	0,608	0,615	0,622	0,629	0,637

Температура рабочего конца, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	мВ									
100	0,643	0,717	0,792	0,869	0,947	1,026	1,106	1,187	1,269	1,352
200	1,436	1,521	1,606	1,692	1,779	1,867	1,955	2,044	2,133	2,223
300	2,314	2,406	2,498	2,591	2,684	2,777	2,871	2,965	3,060	3,154
400	3,249	3,345	3,440	3,536	3,633	3,730	3,826	3,923	4,021	4,119
500	4,218	4,316	4,415	4,515	4,615	4,715	4,815	4,915	5,016	5,118
600	5,220	5,322	5,425	5,528	5,631	5,734	5,837	5,941	6,046	6,151
700	6,256	6,362	6,467	6,573	6,679	6,786	6,893	7,000	7,108	7,216
800	7,325	7,434	7,543	7,653	7,763	7,872	7,983	8,094	8,205	8,316
900	8,428	8,540	8,653	8,765	8,878	8,992	9,106	9,220	9,334	9,449
1000	9,564	9.679	9,795	9,911	10,028	10,145	10,262	10,379	10,496	10,614
1100	10,732	10,850	10,968	11,086	11,205	11,324	11,443	11,563	11,683	11,803

Продолжение табл. П4-7-1

Температура рабочего конца, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	мВ									
1200	11,923	12,043	12,163	12,284	12,404	12,525	12,645	12,766	12,887	13,008
1300	13,129	13,250	13,371	13,492	13,613	13,734	13,855	13,975	14,096	14,217
1400	14,338	14,458	14,579	14,699	14,819	14,939	15,059	15,179	15,298	15,418
1500	15,537	15,656	15,775	15,893	16,011	16,129	16,247	16,364	16,481	16,598
1600	16,714									

Таблица П4-7-2

Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа ТПР стандартной градуировки ПР30/6 при температуре свободных концов 0°С. ГОСТ 3044-74

Температура рабочего конца, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	мВ									
300	0,443	0,475	0,508	0,542	0,577	0,613	0,650	0,688	0,727	0,767
400	0,809	0,850	0,894	0,938	0,983	1,029	1,076	1,124	1,173	1,223
500	1,274	1,325	1,377	1,431	1,485	1,541	1,597	1,654	1,712	1,771
600	1,831	1,892	1,954	2,017	2,080	2,143	2,208	2,274	2,341	2,409
700	2,479	2,548	2,619	2,691	2,763	2,836	2,910	2,985	3,061	3,137
800	3,215	3,294	3,373	3,453	3,533	3,614	3,697	3,780	3,864	3,948
900	4,034	4,120	4,207	4,294	4,383	4,473	4,563	4,653	4,744	4,836
1000	4,929	5,023	5,117	5,221	5,306	5,403	5,500	5,597	5,695	5,793
1100	5,893	5,993	6,094	6,195	6,297	6,400	6,503	6,607	6,711	6,816
1200	6,921	7,027	7,134	7,241	7,349	7,457	7,565	7,674	7,783	7,893
1300	8,003	8,114	8,225	8,337	8,449	8,561	8,674	8,789	8,900	9,014
1400	9,128	9,242	9,356	9,471	9,586	9,702	9,818	9,934	10,050	10,166
1500	10,282	10,398	10,515	10,633	10,750	10,867	10,985	11,102	11,220	11,338
1600	11,456	11,574	11,692	11,810	11,928	12,046	12,164	12,282	12,400	12,518
1700	12,637	12,755	12,872	12,990	13,108	13,226	13,344	13,461	13,578	13,695
1800	13,812									

Таблица П4-7-3

Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа ТХА. стандартной градуировки ХА при температуре свободных концов 0°С. ГОСТ 3044-74

Температура рабочего конца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	мВ									
0	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
10	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16
30	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57
40	1,61	1,65	1,69	1,73	1,77	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98
50	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39
60	2,43	2,47	2,51	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81
70	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,06	3,10	3,14	3,18	3,22
80	3,26	3,30	3,34	3,39	3,43	3,47	3,51	3,55	3,60	3,64
90	3,68	3,72	3,76	3,81	3,85	3,89	3,93	3,97	4,02	4,06

Температура рабочего конца, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	мВ									
—200	—5,75									
—100	—3,51	—3,81	—4,09	—4,36	—4,61	—4,85	—5,07	—5,27	—5,45	—5,61
—0	0,00	—0,39	—0,77	—1,14	—1,50	—1,86	—2,21	—2,55	—2,88	—3,20
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,30	14,72	15,14	15,56	15,99
400	16,40	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,22
500	20,65	21,08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,63	24,06	24,49
600	24,91	25,33	25,76	26,19	26,61	27,04	27,46	27,88	28,30	28,73
700	29,15	29,57	29,99	30,41	30,83	31,24	31,66	32,08	32,49	32,90
800	33,32	33,72	34,13	34,55	34,95	35,36	35,76	36,17	36,57	36,97

Температура рабочего конца, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	мВ									
900	37,37	37,77	38,17	38,57	38,97	39,36	39,76	40,15	40,54	40,93
1000	41,32	41,71	42,09	42,48	42,88	43,26	43,64	44,02	44,40	44,78
1100	45,16	45,54	45,91	46,29	46,66	47,03	47,40	47,77	48,14	48,50
1200	48,87	49,23	49,59	49,95	50,31	50,67	51,02	51,38	51,73	52,08
1300	52,43									

Таблица П4-7-4

Термо-э.д.с. термоэлектрических термометров типа ТХК стандартной градуировки ХК при температуре свободных концов 0 °С ГОСТ 3044-74

Температура рабочего конца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	мВ									
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,03	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,55	5,62	5,69	5,76	5,83	5,90	5,97	6,04	6,11
90	6,18	6,25	6,32	6,39	6,46	6,53	6,60	6,67	6,74	6,81

Температура рабочего конца, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	мВ									
—200	—9,69									
—100	—5,74	—6,20	—6,55	—7,08	—7,49	—7,89	—8,27	—8,64	—9,09	—9,35
—0	0,00	—0,64	—1,27	—1,89	—2,50	—3,11	—3,69	—4,24	—4,76	—5,26
100	6,88	7,62	8,36	9,11	9,86	10,62	11,39	12,17	12,96	13,77
200	14,59	15,41	16,24	17,07	17,90	18,73	19,56	20,39	21,22	22,05
300	22,88	23,72	24,57	25,42	26,28	27,14	29,01	28,88	29,75	30,62
400	31,49	32,36	33,24	34,12	35,00	35,88	36,76	37,64	38,52	39,40
500	40,28	41,17	42,06	42,95	43,83	44,71	45,59	46,47	47,35	48,23
600	49,11	49,99	50,87	51,75	52,63	53,50	54,37	55,24	56,11	56,98
700	57,85	58,72	59,59	60,45	61,31	62,17	63,03	63,89	64,75	65,61
800	66,47									

Таблица П5-2-1

Градуировочная таблица платиновых термометров сопротивления

А. Номинальное сопротивление термометра при 0°С $R_0=46$ Ом. Обозначение градуировки—гр 21

°С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Ом									
—200	7,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—100	27,44	25,54	23,63	21,72	19,79	17,85	15,90	13,93	11,95	9,96
—0	46,00	44,17	42,34	40,50	38,65	36,80	34,94	33,08	31,21	29,33
0	46,00	47,82	49,64	51,45	53,26	55,06	56,86	58,65	60,43	62,21
100	63,99	65,76	67,52	69,28	71,03	72,76	74,52	76,26	77,99	79,71
200	81,43	83,15	84,86	86,56	88,26	89,96	91,64	93,33	95,00	96,68

0° C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Ом									
300	98,34	100,01	101,66	103,31	104,96	106,60	108,23	109,86	111,48	113,10
400	114,72	116,32	117,93	119,52	121,11	122,70	124,28	125,86	127,43	128,99
500	130,55	132,10	133,65	135,20	136,73	138,27	139,79	141,32	142,83	144,34
600	145,85	147,35	148,84	150,33	151,81	153,30	154,77	156,23	157,70	159,15
700	160,60	162,04	163,48	164,92	166,36	—	—	—	—	—
750	167,77									

Б. Номинальное сопротивление термометра при 0°C $R_0 = 10{,}000$ Ом. Обозначение градуировки — гр 20
Номинальное сопротивление термометра при 0°C $R_0 = 100{,}00$ Ом. Обозначение градуировки — гр. 22

0° C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—200	17,28									
—100	59,65	55,52	51,38	47,21	43,02	38,80	34,56	30,29	25,98	21,65
—0	100,00	96,03	92,04	88,04	84,03	80,00	75,96	71,91	67,84	63,75
0	100,00	103,96	107,91	111,85	115,78	119,70	123,60	127,49	131,37	135,24
100	139,10	142,95	146,78	150,60	154,41	158,21	162,00	165,78	169,54	173,29
200	177,03	180,76	184,48	188,18	191,88	195,56	199,23	202,89	206,53	210,17
300	213,79	217,40	221,00	224,59	228,17	231,73	235,29	238,83	242,36	245,88
400	249,38	252,88	256,36	259,83	263,29	266,74	270,18	273,60	277,01	280,41
500	283,80	287,18	290,55	293,91	297,25	300,58	303,90	307,21	310,50	313,79
600	317,06	320,32	323,57	326,80	330,03	333,25	336,45	339,64	342,82	345,99
700	349,14	352,29	355,42	358,54	361,65	—	—	—	—	—
750	364,74									

Примечание: Для термометров с $R_0 = 10$ Ом (гр 20) все значения разделить на 10. Значения электрического сопротивления платиновых термометров при температуре t в омах, указанные в градуировочных таблицах А и Б, вычислены по формулам (ГОСТ 6651-59):

$R_t = R_0\,[1 + At + Bt^2 + C\,(t - 100)\,t^3]$, при значениях t : $-200°C \leqslant t \leqslant 0°C$;

$R_t = R_0\,[1 + At + Bt^2]$, при значениях t : $0°C \leqslant t \leqslant 750°C$.

Значения постоянных коэффициентов: $A = 3{,}96847 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$; $B = -5{,}847 \cdot 10^{-7}\ °C^{-2}$; $C = -4{,}22 \cdot 10^{-12}\ °C^{-4}$.

Таблица П5-2-2

Градуировочная таблица медных термометров сопротивления

А. Номинальное сопротивление термометра при 0°С $R_0 = 53{,}00$ Ом. Обозначение градуировки — гр 23

°С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	Ом									
—50	41,71	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—0	53,00	50,74	48,48	46,23	43,97	—	—	—	—	—
0	53,00	55,26	57,52	59,77	62,03	64,29	66,55	68,81	71,06	73,32
100	75,58	77,84	80,09	82,35	84,61	86,87	89,13	91,38	—	—
180	93,64									

Б. Номинальное сопротивление термометра при 0°С $R_0 = 100{,}00$ Ом. Обозначение градуировки — гр 24

—50	78,70	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—0	100,00	95,74	91,48	87,22	82,96	—	—	—	—	—
0	100,00	104,26	108,52	112,78	117,04	121,30	125,56	129,82	134,08	138,34
100	142,60	146,86	151,12	155,38	159,64	163,90	168,16	172,42	—	—
180	176,68									

Примечание. Значения электрического сопротивления медных термометров при температуре $-50°C \leqslant t \leqslant +180°C$ в омах, указанные в градуировочных таблицах А и Б, вычислены по формуле (ГОСТ 6651-59):

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления меди ($\alpha = 4{,}26 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$).

Поправки для приведения барометрического давления к широте 45° и к уровню моря (к нормальной силе тяжести)

А. Поправки для приведения к географической широте 45°

Географическая широта, град	Барометрическое давление, приведенное к 0°С, мм рт. ст.				Географическая широта, град	Барометрическое давление, приведенное к 0°С, мм рт. ст.			
	650	700	750	800		650	700	750	800
	Поправки в мм рт. ст.					Поправки в мм рт. ст.			
30	—0,89	—0,96	—1,03	—1,09	50	+0,26	+0,29	+0,31	+0,34
35	—0,61	—0,66	—0,72	—0,77	55	+0,55	+0,60	+0,64	+0,69
40	—0,33	—0,36	—0,38	—0,41	60	+0,82	+0,89	+0,96	+1,18
45	—0,03	—0,04	—0,04	—0,04	65	+1,08	+1,16	+1,24	+1,32

Примечание. Для промежуточных давлений и широт поправки находят путем интерполяции.

Б. Поправки для приведения к уровню моря

Высота над уровнем моря, м	Барометрическое давление, приведенное к 0°С, мм рт. ст.								
	620	640	660	680	700	720	740	760	780
	Поправки в мм рт. ст. (все поправки отрицательные)								
100	—	—	—	—	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
200	—	—	—	—	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
300	—	—	—	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	—
400	—	—	—	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	—
500	—	—	—	0,11	0,12	0,12	0,12	—	—
600	—	—	0,10	0,13	0,14	0,14	0,14	—	—
700	—	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	—	—	—
800	—	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	—	—	—
900	—	0,18	0,19	0,19	0,20	—	—	—	—
1000	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	—	—	—	—
1200	0,24	0,24	0,25	0,26	—	—	—	—	—
1400	0,27	0,28	0,29	0,30	—	—	—	—	—
1600	0,31	0,32	0,33	—	—	—	—	—	—
1800	0,35	0,36	—	—	—	—	—	—	—
2000	0,39	—	—	—	—	—	—	—	—

Поправки для приведения показаний ртутного барометра с латунной шкалой к 0°С (все поправки имеют отрицательный знак)

Температура, °С	Поправка, мм рт. ст., при барометрическом давлении, мм рт. ст.								
	700	710	720	730	740	750	760	770	780
10	1,14	1,16	1,18	1,19	1,21	1,22	1,24	1,26	1,27
11	1,26	1,28	1,29	1,31	1,33	1,35	1,36	1,38	1,40
12	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53
13	1,48	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59	1,61	1,63	1,65
14	1,60	1,62	1,64	1,67	1,69	1,71	1,73	1,76	1,78
15	1,71	1,74	1,76	1,78	1,81	1,83	1,86	1,88	1,91
16	1,83	1,85	1,88	1,90	1,93	1,96	1,98	2,01	2,03
17	1,94	1,97	2,00	2,02	2,05	2,08	2,11	2,13	2,16
18	2,05	2,08	2,11	2,14	2,17	2,20	2,23	2,26	2,29
19	2,17	2,20	2,23	2,26	2,29	2,32	2,35	2,38	2,41
20	2,28	2,31	2,35	2,38	2,41	2,44	2,48	2,51	2,54
21	2,39	2,43	2,46	2,50	2,53	2,56	2,60	2,63	2,67
22	2,51	2,54	2,58	2,62	2,65	2,69	2,72	2,76	2,79
23	2,62	2,66	2,70	2,73	2,77	2,81	2,84	2,88	2,92
24	2,73	2,77	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05
25	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05	3,09	3,13	3,17
26	2,96	3,00	3,05	3,09	3,13	3,17	3,21	3,26	3,30
27	3,07	3,12	3,16	3,21	3,25	3,29	3,34	3,38	3,42
28	3,19	3,23	3,28	3,32	3,37	3,41	3,46	3,50	3,55
29	3,30	3,35	3,39	3,44	3,49	3,54	3,58	3,63	3,68
30	3,41	3,46	3,51	3,56	3,61	3,66	3,71	3,75	3,80

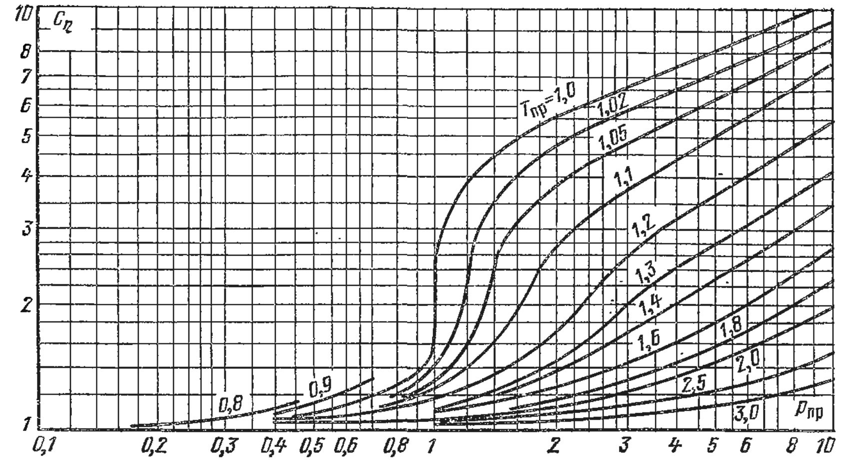


Рис. П14-3-1. Поправочный множитель C_η для вычисления вязкости газов.

Таблица П14-3-1

Динамическая вязкость пара и воды $\eta \cdot 10^6$, Па · с

Температура, °C	Давление, МПа							
	0,1	0,5	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5
0	1792	1791	1790	1786	1780	1775	1769	1764
25	890,7	890,6	890,5	890,2	889,7	889,3	888,8	888,4
50	547,1	547,1	547,2	547,5	547,9	548,3	548,7	549,1
75	378,3	378,4	378,6	378,9	379,6	380,2	380,8	381,5
100	12,28	282,3	282,4	282,8	283,5	284,2	284,8	285,5
150	14,19	181,9	182,0	182,4	183,1	183,7	184,4	185,0
200	16,18	16,07	15,93	133,8	134,5	135,1	135,7	136,3
250	18,22	18,15	18,07	17,93	106,1	106,8	107,5	108,2
300	20,29	20,25	20,20	20,06	19,86	19,74	86,4	87,4
350	22,37	22,35	22,32	22,24	22,16	22,13	22,18	22,39
375	23,41	23,39	23,37	23,32	23,27	23,28	23,35	23,52
400	24,45	24,44	24,42	24,39	24,38	24,40	24,49	24,65
425	25,49	25,48	25,47	25,46	25,47	25,52	25,62	25,77
450	26,52	26,52	26,52	26,52	26,55	26,61	26,72	26,88
475	27,55	27,55	27,55	27,57	27,61	27,70	27,82	27,98
500	28,57	28,58	28,58	28,61	28,67	28,77	28,90	29,06
550	30,61	30,61	30,63	30,67	30,76	30,87	31,01	31,18
600	32,61	32,63	32,64	32,70	32,81	32,93	33,09	33,3
650	34,6	34,6	34,6	34,7	34,8	35,0	35,1	35,3
700	36,6	36,6	36,6	36,7	36,8	36,9	37,1	37,3

Температура, °С	Давление, МПа							
	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	35,0
0	1759	1754	1749	1744	1740	1735	1731	1722
25	888,0	887,7	887,4	887,1	886,8	886,6	886,3	886,0
50	549,6	550,0	550,4	550,9	551,4	551,8	552,3	553,3
75	382,1	382,7	383,3	384,0	384,6	385,3	385,9	387,2
100	286,2	286,9	287,5	288,2	288,9	289,5	290,2	291,6
150	185,7	186,3	186,9	187,6	188,2	188,8	189,5	190,7
200	137,0	137,6	138,2	138,8	139,4	140,0	140,5	141,7
250	108,9	109,5	110,2	110,8	111,4	112,0	112,6	113,8
300	83,3	89,2	90,0	90,9	91,7	92,4	93,2	94,6
350	22,91	66,8	69,1	71,0	72,6	74,0	75,3	77,6
375	23,84	24,45	25,77	47,4	58,2	61,9	64,5	68,2
400	24,91	25,32	25,96	27,02	28,09	33,62	43,67	55,7
425	26,01	26,34	26,80	27,44	28,36	29,70	31,74	39,26
450	27,10	27,39	27,77	28,26	28,89	29,71	30,78	33,99
475	28,19	28,46	28,79	29,20	29,70	30,31	31,06	33,07
500	29,27	29,52	29,82	30,18	30,61	31,11	31,70	33,19
550	31,39	31,62	31,89	32,19	32,54	32,93	33,4	34,4
600	33,5	33,7	33,9	34,2	34,5	34,8	35,2	36,0
650	35,5	35,7	35,9	36,2	36,5	36,7	37,1	37,8
700	37,5	37,7	37,9	38,1	38,4	38,6	38,9	39,6

Температура, °С	Давление, МПа							
	40	45	50	55	60	65	70	75
0	1714	1707	1700	1693	1687	1681	1676	1671
25	885,7	885,6	885,5	885,5	885,7	885,9	886,2	886,6
50	554,3	555,3	556,4	557,5	558,6	559,7	560,9	562,1
75	388,5	389,8	391,1	392,4	393,7	395,0	396,4	397,7
100	292,9	294,2	295,6	296,9	298,2	299,6	300,9	302,2
150	191,9	193,2	194,4	195,6	196,8	198,1	199,3	200,5
200	142,8	144,0	145,1	146,2	147,3	148,4	149,5	150,6
250	115,0	116,1	117,2	118,3	119,4	120,5	121,5	122,5
300	96,0	97,3	98,6	99,8	100,9	102,1	103,2	104,3
350	79,6	81,4	83,1	84,7	86,1	87,5	88,9	90,1
375	71,1	73,5	75,6	77,4	79,2	80,8	82,2	83,7
400	61,3	64,9	67,8	70,2	72,3	74,2	75,9	77,5
425	48,62	50,0	59,4	62,7	65,4	67,7	69,7	71,5
450	39,03	45,18	50,7	55,0	58,5	61,3	63,7	65,9
475	35,93	39,71	44,1	48,4	52,2	55,4	58,2	60,6
500	35,2	37,7	40,7	44,0	47,4	50,6	53,4	56,0
550	35,6	37,1	38,9	40,8	43,0	45,2	47,4	49,6
600	37,0	38,1	39,3	40,6	42,1	43,7	45,3	46,9
650	38,6	39,4	40,4	41,4	42,6	43,7	45,0	46,2
700	40,2	41,0	41,8	42,6	43,5	44,5	45,5	46,5

Таблица П14-3-2

Свойства газов

Наименование газа	Химическая формула	Показатель адиабаты k при атмосферном давлении и температуре, °С				Плотность, кг/м³		Динамическая вязкость $\eta\cdot10^6$, Па·с, при температуре, °С						Критические параметры состояния	
		20	200	400	600	при 0°С и 1,0332 кгс/см²	при 20°С и 1,0332 кгс/см²	—30	0	50	100	200	300	$T_{кр}$, К	$p_{кр}$, кгс/см²
Азот	N_2	1,40	1,39	1,37	1,35	1,251	1,166	15,200	16,671	19,025	21,280	25,203	27,949	126,2	34,6
Аммиак	NH_3	1,31	1,25	—	—	0,7710	0,7184	8,336	9,218	11,278	13,141	16,867	20,594	405,6	115,2
Ацетилен	C_2H_2	1,23	1,19	1,16	1,15	1,171	1,091	—	9,414	11,082	12,552	—	—	309,2	63,6
Водород	H_2	1,41	1,40	1,39	1,39	0,0899	0,0837	8,041	8,728	9,708	10,689	12,356	13,925	33,2	13,2
Воздух	—	1,40	1,39	1,37	1,35	1,293	1,205	15,592	17,358	20,006	22,261	25,988	29,714	133,8	38,4
Водяной пар	H_2O	1,31	—	—	—	0,8041	0,7496	—	8,532	—	—	—	—	647,3	225,6
Кислород	O_2	1,40	1,37	1,34	1,32	1,429	1,331	17,358	19,025	21,771	24,615	29,028	32,950	154,8	51,8
Метан	CH_4	1,31	1,23	1,17	1,14	0,7168	0,6679	9,316	10,297	11,964	13,533	16,083	18,338	191,1	47,3
Окись углерода	CO	1,40	1,39	1,37	1,35	1,250	1,165	14,710	16,671	19,025	21,280	25,203	27,949	132,8	35,6
Сернистый газ	SO_2	1,26	1,22	1,20	1,19	2,927	2,727	10,199	11,670	14,024	16,279	20,692	24,517	430,6	80,4
Сероводород	H_2S	1,32	1,29	1,26	1,24	1,539	1,434	10,493	11,768	13,925	16,083	20,594	24,418	373,6	91,8
Углекислый газ	CO_2	1,30	1,24	1,20	1,19	1,977	1,842	12,749	14,122	16,279	18,534	22,653	26,674	304,2	75,7
Хлор	Cl_2	1,34	1,32	—	—	3,214	2,995	11,376	12,552	14,710	16,867	20,986	25,105	417,2	78,6
Этан	C_2H_6	1,20	1,12	1,09	1,08	1,356	1,263	7,747	8,630	10,003	11,376	14,024	16,475	305,4	49,8
Этилен	C_2H_4	1,24	1,16	1,12	1,10	1,260	1,174	8,336	9,512	11,278	12,847	15,789	18,240	283,0	52,2

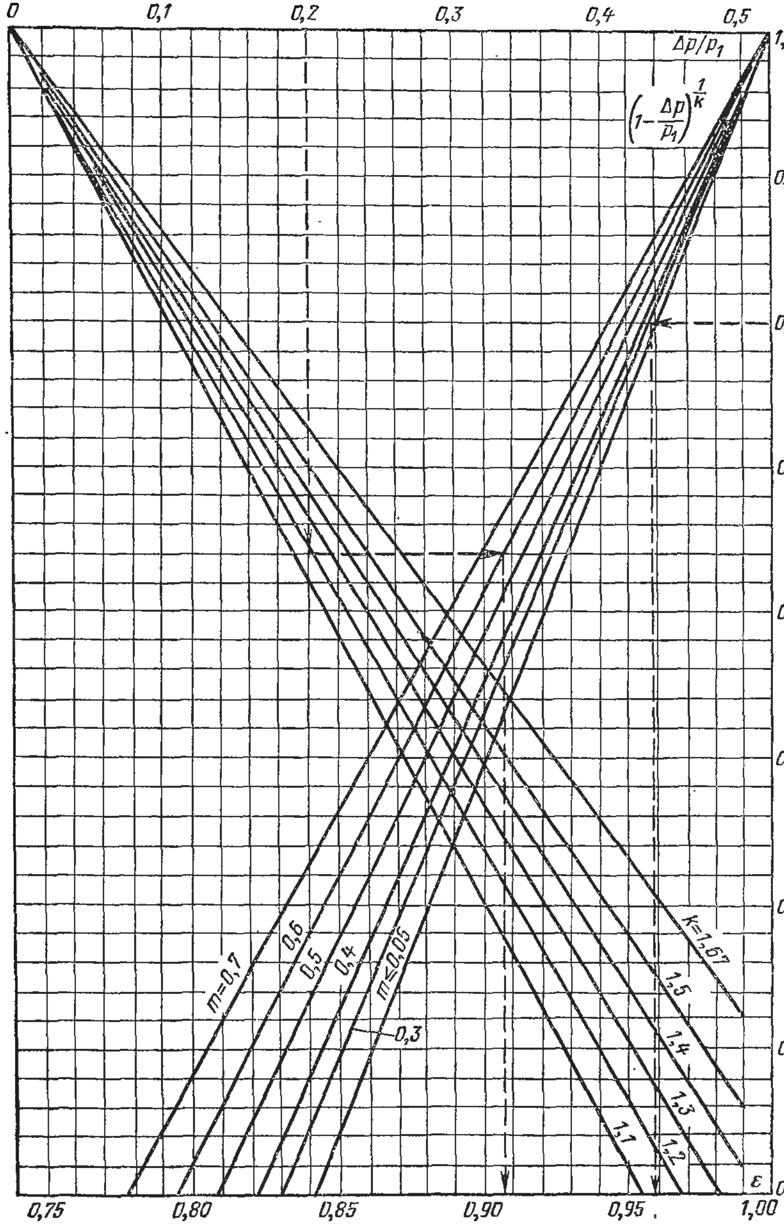


Рис. П14-4-1. Номограмма для определения поправочного множителя ε для диафрагм при $\Delta p/p_1 \leqslant 0{,}5$.

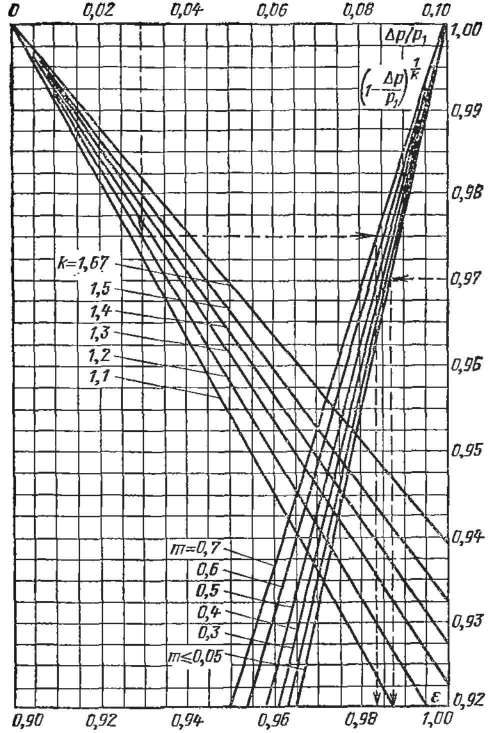
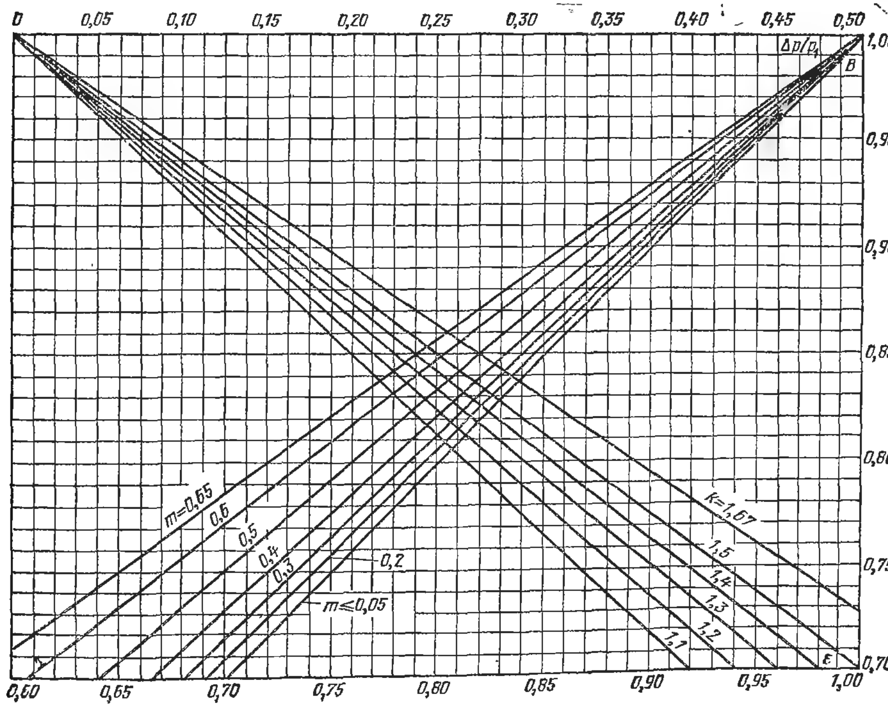


Рис. П14-4-2. Номограмма для определения поправочного множителя ε для диафрагм при $\Delta p/p_1 \leqslant 0,1$.

Рис. П14-4-3. Номограмма для определения поправочного множителя ε для сопла.



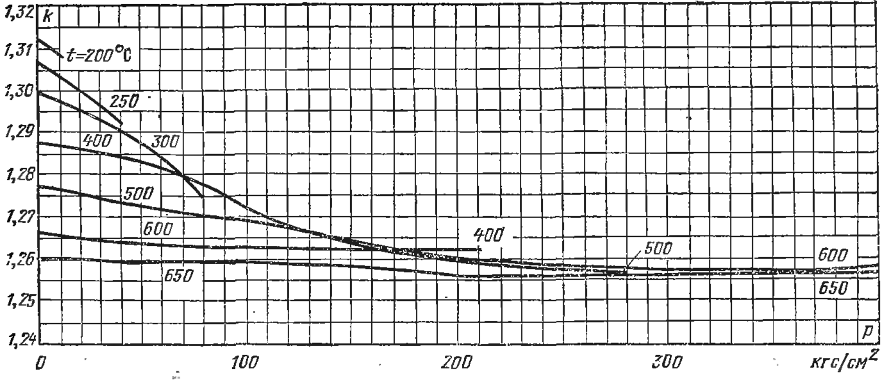


Рис. П14-4-4. Показатель адиабаты k для перегретого водяного пара.

Таблица П14-4-1

Значения

$$B=\left[\left(1-\frac{\Delta p}{p_1}\right)^{2/k}\frac{k}{k-1}\,\frac{1-\left(1-\dfrac{\Delta p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{\dfrac{\Delta p}{p_1}}\right]$$

$\frac{\Delta p}{p_1}$	k						
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
0,005	0,9970	0,9968	0,9971	0,9973	0,9973	0,9977	0,9952
0,050	0,9647	0,9684	0,9708	0,9729	0,9746	0,9762	0,9779
0,100	0,9305	0,9366	0,9408	0,9449	0,9485	0,9516	0,9547
0,150	0,8946	0,9029	0,9100	0,9161	0,9215	0,9262	0,9299
0,200	0,8580	0,8689	0,8781	0,8865	0,8936	0,9022	0,9039
0,250	0,8199	0,8340	0,8446	0,8557	0,8647	0,8726	0,8777
0,300	0,7819	0,7981	0,8120	0,8241	0,8350	0,8441	0,8502
0,350	0,7426	0,7611	0,7770	0,7914	0,8034	0,8144	0,8216
0,400	0,7021	0,7228	0,7409	0,7569	0,7709	0,7834	0,7916
0,450	0,6605	0,6823	0,7032	0,7209	0,7368	0,7513	0,7599
0,500	0,6175	0,6450	0,6643	0,6837	0,7009	0,7060	0,7266

Таблица П14-5-1

Плотность воды, кг/м³, в зависимости от температуры и давления

t, °C	p, кгс/см² 1	20	50	80	100	130	160	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	999,8	1000,8	1002,2	1003,7	1004,6	1006,1	1007,6	1009,5
10	999,8	1000,7	1002,0	1003,4	1004,3	1005,7	1007,0	1008,9
20	998,3	999,2	1000,5	1001,8	1002,7	1003,4	1005,3	1007,0
30	995,7	996,6	997,9	999,2	1000,0	1001,3	1002,6	1004,2
40	992,3	993,1	994,4	995,6	996,5	997,8	999,0	1000,0
50	988,0	988,9	990,2	991,5	992,3	993,5	994,8	996,4
55	985,7	986,6	987,8	989,1	990,0	991,2	992,4	994,1
60	983,2	984,1	985,3	986,6	987,5	988,7	989,9	991,6
65	980,5	981,4	982,6	984,0	984,8	986,1	987,3	989,0
70	977,7	978,6	979,8	981,2	982,0	983,3	984,5	986,2
75	974,7	975,6	976,9	978,2	979,1	980,3	981,7	983,4
80	971,6	972,5	973,9	975,1	976,1	977,3	978,7	980,4
85	968,4	969,3	970,7	972,0	972,9	974,2	975,6	977,3
90	965,2	966,0	967,4	968,7	969,6	971,0	972,3	974,0
95	—	962,6	964,0	965,3	966,2	967,6	968,9	970,6

t, °C	p, кгс/см² 1	20	50	80	100	130	160	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	—	959,0	960,4	961,8	962,7	964,1	965,4	967,2
102	—	957,5	958,9	960,3	961,3	962,6	964,0	965,8
104	—	956,0	957,4	958,9	959,9	961,2	962,5	964,4
106	—	954,6	956,0	957,4	958,5	959,7	961,1	962,9
108	—	953,1	954,5	956,0	957,0	958,3	959,6	961,5
110	—	951,6	953,0	954,5	955,5	956,8	958,2	960,1
112	—	950,1	951,5	952,9	954,0	955,3	956,7	958,6
114	—	948,6	950,0	951,4	952,4	953,7	955,2	957,1
116	—	947,0	948,4	949,8	950,9	952,2	953,6	955,6
118	—	945,4	946,9	948,3	949,3	950,6	952,1	954,1
120	—	943,8	945,3	946,7	947,7	949,1	950,6	952,6
122	—	942,1	943,7	945,1	946,1	947,5	949,0	951,0
124	—	940,5	942,0	943,5	944,5	945,9	947,4	949,4
126	—	938,8	940,4	941,8	942,9	944,3	945,8	947,8
128	—	937,1	938,7	940,2	941,3	942,7	944,2	946,2
130	—	935,4	937,0	938,6	939,6	941,1	942,6	944,6
132	—	933,7	935,3	936,9	937,9	939,4	940,9	942,9

	p, кгс/см²												
t, °C	1	20	50	80	100	130	160	200	240	280	320	360	400
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
134	—	932,0	933,6	935,2	936,2	937,7	939,2	941,2	—	—	—	—	—
136	—	930,3	931,9	933,4	934,5	936,1	937,6	939,6	—	—	—	—	—
138	—	928,6	930,1	931,7	932,8	934,4	935,9	937,9	—	—	—	—	—
140	—	926,8	928,4	930,0	931,1	932,7	934,2	936,2	—	—	—	—	—
142	—	925,0	926,7	928,2	929,4	930,9	932,4	934,5	—	—	—	—	—
144	—	923,2	924,9	926,4	927,6	929,2	930,7	932,8	—	—	—	—	—
146	—	921,3	923,1	924,6	925,8	927,4	928,9	931,0	—	—	—	—	—
148	—	919,5	921,3	922,8	924,0	925,6	927,2	929,3	—	—	—	—	—
150	—	917,6	919,4	921,0	922,2	923,8	925,4	927,6	929,6	931,7	933,7	935,7	937,6
152	—	915,7	917,5	919,1	920,4	922,0	923,6	925,8	927,8	930,0	932,0	934,0	935,9
154	—	913,9	915,6	917,3	918,5	920,1	921,7	923,9	926,0	928,2	930,2	932,3	934,2
156	—	912,0	913,7	915,4	916,6	918,3	919,9	922,1	924,2	926,4	928,5	930,5	932,5
158	—	910,0	911,7	913,6	914,7	916,4	918,0	920,2	922,4	924,6	926,7	928,8	930,8
	—												
160	—	908,1	909,8	911,7	912,8	914,5	916,2	918,4	920,6	922,8	924,9	927,0	929,0
162		906,2	907,9	909,7	910,9	912,6	914,3	916,5	918,7	921,0	923,1	925,2	927,2
164	—	904,2	905,9	907,7	908,9	910,7	912,4	914,6	916,9	919,1	921,3	923,4	925,4
166	—	902,2	903,9	905,8	907,0	908,7	910,4	912,7	915,0	917,3	919,4	921,6	923,6
168	—	900,2	901,9	903,8	905,0	906,8	908,5	910,8	913,1	915,4	917,6	919,8	921,8
170	—	898,1	899,9	901,8	903,0	904,8	906,6	908,9	911,2	913,5	915,7	917,9	920,0
172	—	896,0	897,9	899,8	901,0	902,8	904,6	906,9	909,3	911,6	913,8	916,0	918,2
174	—	893,9	895,8	897,7	899,0	900,8	902,6	904,9	907,4	909,7	911,9	914,1	916,3
176	—	891,8	893,7	895,7	896,9	898,8	900,5	903,0	905,4	907,7	910,0	912,2	914,5
178	—	889,6	891,6	893,6	894,9	896,8	898,5	901,0	903,5	905,8	908,1	910,3	912,6

p, кгс/см²

t, °C	1	20	50	80	100	130	160	200	240	280	320	360	400
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
180	—	887,5	889,5	891,5	892,8	894,7	896,5	899,0	901,5	903,8	906,1	908,4	910,7
182	—	885,4	887,4	889,4	890,7	892,6	894,4	897,0	899,5	901,8	904,1	906,4	908,8
184	—	883,2	885,2	887,2	888,6	890,5	892,3	894,9	897,5	899,8	902,1	904,5	906,8
186	—	881,0	883,1	885,1	886,4	888,4	890,3	892,9	895,4	897,8	900,1	902,5	904,9
188	—	878,8	880,9	882,9	884,3	886,3	888,2	890,8	893,4	895,8	898,1	900,5	902,9
190	—	876,6	878,7	880,7	882,1	884,2	886,1	888,7	891,3	893,7	896,1	898,5	900,9
192	—	874,3	876,5	878,5	879,9	882,0	883,9	886,6	889,2	891,6	894,1	896,5	898,9
194	—	872,0	874,2	876,3	877,7	879,8	881,7	884,5	887,1	889,5	892,0	894,5	896,9
196	—	869,7	871,9	874,1	875,4	877,6	879,6	882,4	884,9	887,4	890,0	892,4	894,9
198	—	867,4	869,6	871,8	873,2	875,4	877,4	880,2	882,8	885,3	887,9	890,4	892,9
200	—	865,0	867,3	869,5	870,9	873,1	875,2	878,0	880,6	883,2	885,8	888,3	890,8
202	—	862,6	865,0	867,2	868,6	870,8	872,9	875,8	878,4	881,1	883,7	887,2	888,7
204	—	860,2	862,6	864,8	866,3	868,5	870,6	873,5	876,3	878,9	881,5	884,1	886,6
206	—	857,7	860,2	862,4	863,9	866,2	868,4	871,3	874,1	876,7	879,4	882,0	884,5
208	—	855,3	857,8	860,0	861,6	863,9	866,1	869,0	871,8	874,5	877,2	879,9	882,4
210	—	852,9	855,3	857,6	859,2	861,5	863,8	866,7	869,6	872,3	875,0	877,7	880,3
212	—	—	852,8	855,2	856,8	859,1	861,4	864,4	867,3	870,1	872,8	875,5	878,1
214	—	—	850,3	852,7	854,4	856,7	859,0	862,0	865,0	867,9	870,6	873,3	876,0
216	—	—	847,8	850,2	852,0	854,3	856,6	859,7	862,7	865,6	868,4	871,1	873,8
218	—	—	845,3	847,7	849,5	851,9	854,2	857,3	860,4	863,3	866,2	868,9	871,6
220	—	—	842,7	845,2	847,0	849,4	851,8	854,9	858,0	861,0	863,9	866,6	869,4
222	—	—	840,1	842,7	844,5	846,9	849,3	852,5	855,6	858,6	861,6	864,3	867,2
224	—	—	837,5	840,1	841,9	844,4	846,8	850,1	853,2	856,2	859,3	862,0	864,9
226	—	—	834,8	837,5	839,3	841,9	844,3	847,6	850,8	853,8	856,9	859,7	862,7
228	—	—	832,1	834,9	836,7	839,3	841,8	845,1	848,4	851,4	854,6	857,4	860,4

t, °C	p, кгс/см²: 1	20	50	80	100	130	160	200	240	280	320	360	400
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
230	—	—	829,4	832,2	834,0	836,7	839,3	842,6	845,9	849,0	852,2	855,1	858,1
232	—	—	826,7	829,5	831,3	834,1	836,7	840,1	833,4	846,6	849,8	852,8	855,8
234	—	—	823,9	826,7	828,6	831,4	834,1	837,5	841,0	844,2	847,4	850,4	853,4
236	—	—	821,1	823,9	825,9	828,7	831,4	834,9	838,4	841,7	844,9	848,0	851,1
238	—	—	818,2	821,1	823,1	825,9	828,7	832,3	835,9	839,2	842,5	845,6	848,7
240	—	—	815,3	818,3	820,3	823,2	826,0	829,7	833,3	836,7	840,0	843,2	846,3
242	—	—	812,4	815,5	817,5	820,5	823,3	827,0	830,7	834,1	837,5	840,7	843,9
244	—	—	809,4	812,6	814,7	817,7	820,5	824,3	828,0	831,6	835,0	838,3	841,5
246	—	—	806,4	809,7	811,8	814,9	817,8	821,6	825,3	829,0	832,5	835,8	839,0
248	—	—	803,4	806,7	808,9	812,0	815,0	818,9	812,6	826,3	829,9	833,2	836,5
250	—	—	800,3	803,7	805,9	809,1	812,1	816,1	819,9	823,7	827,3	830,7	834,0
252	—	—	797,2	800,7	802,9	806,2	809,2	813,3	817,2	821,0	824,7	828,2	831,5
254	—	—	794,0	797,6	799,8	803,2	806,3	810,5	814,4	818,3	822,0	825,6	829,0
256	—	—	790,8	794,4	796,7	800,2	803,4	807,6	811,7	815,6	819,3	823,0	826,5
258	—	—	787,5	791,2	793,6	797,1	800,4	804,7	808,9	812,8	816,6	820,4	823,9
260	—	—	784,2	788,0	790,4	794,0	797,4	801,8	806,0	810,0	813,9	817,7	821,3
262	—	—	—	784,7	787,2	790,9	794,3	798,8	803,1	807,2	811,2	815,0	818,7
264	—	—	—	781,4	784,0	787,7	791,2	795,8	800,2	804,4	808,4	812,3	816,0
266	—	—	—	778,0	780,7	784,5	788,1	792,8	797,3	801,5	805,6	809,6	813,3
268	—	—	—	774,6	777,3	781,2	784,9	789,7	794,3	798,6	802,8	806,8	810,6
270	—	—	—	771,1	773,9	777,9	781,7	786,6	791,2	795,7	799,9	804,0	807,9

t, °C	p, кгс/см² 1	20	50	80	100	130	160	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
272	—	—	—	767,6	770,5	774,6	778,4	783,4
274	—	—	—	764,0	767,0	771,2	775,1	780,2
276	—	—	—	760,4	763,4	767,7	771,8	777,0
278	—	—	—	756,7	759,8	764,2	768,4	773,7
280	—	—	—	752,9	756,1	760,6	764,9	770,4
282	—	—	—	749,0	752,4	757,0	761,4	767,1
284	—	—	—	745,1	748,6	753,3	757,8	763,7
286	—	—	—	741,1	744,7	749,5	754,2	760,2
288	—	—	—	737,0	740,7	745,7	750,5	756,7
290	—	—	—	732,9	736,6	741,8	746,8	753,1
292	—	—	—	—	732,4	737,9	743,0	749,5
294	—	—	—	—	728,2	733,8	739,2	745,8
296	—	—	—	—	723,8	729,7	735,2	742,0
298	—	—	—	—	719,4	725,5	731,2	738,2
300	—	—	—	—	714,9	721,2	727,1	734,3
301	—	—	—	—	—	719,1	725,0	732,4
302	—	—	—	—	—	716,9	722,9	730,4
303	—	—	—	—	—	714,7	720,8	728,4
304	—	—	—	—	—	712,4	718,7	726,4
305	—	—	—	—	—	710,1	716,5	724,4
306	—	—	—	—	—	707,8	714,3	722,3
307	—	—	—	—	—	705,5	712,1	720,2
308	—	—	—	—	—	703,1	709,8	718,1
309	—	—	—	—	—	700,7	707,5	716,0
310	—	—	—	—	—	698,2	705,2	713,8

t, °C	p, кгс/см² 1	20	50	80	100	130	160	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
311	—	—	—	—	—	695,7	702,9	711,7
312	—	—	—	—	—	693,2	700,6	709,5
313	—	—	—	—	—	690,6	698,2	707,3
314	—	—	—	—	—	688,0	695,8	705,0
315	—	—	—	—	—	685,4	693,4	702,8
316	—	—	—	—	—	682,7	690,9	700,5
317	—	—	—	—	—	680,0	688,4	698,2
318	—	—	—	—	—	677,3	685,8	695,8
319	—	—	—	—	—	674,5	683,2	693,4
320	—	—	—	—	—	671,7	680,6	691,0
321	—	—	—	—	—	—	678,0	688,6
322	—	—	—	—	—	—	675,4	686,2
323	—	—		—	—	—	672,7	683,7
324	—	—	—	—	—	—	669,9	681,2
325	—	—	—	—	—	—	667,1	678,7
326	—	—	—	—	—	—	664,2	676,1
327	—	—	—	—	—	—	661,2	673,5
328	—	—	—	—	—	—	658,2	670,9
329	—	—	—	—	—	—	655,1	668,1
330	—	—	—	—	—	—	651,9	665,3
331	—	—	—	—	—	—	648,6	662,6
332	—	—	—	—	—	—	645,3	659,8
333	—	—	—	—	—	—	642,0	657,0
334	—	—	—	—	—	—	638,6	654,1
335	—	—	—	—	—	—	635,1	651,1

Продолжение табл. П14-5-1

t, °C	p, кгс/см² 1	20	50	80	100	130	160	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
336	—	—	—	—	—	—	631,5	648,1
337	—	—	—	—	—	—	627,9	645,0
338	—	—	—	—	—	—	624,2	641,8
339	—	—	—	—	—	—	620,4	638,5
340	—	—	—	—	—	—	616,6	635,2
341	—	—	—	—	—	—	—	632,2
342	—	—	—	—	—	—	—	629,2
343	—	—	—	—	—	—	—	626,0
344	—	—	—	—	—	—	—	622,5
345	—	—	—	—	—	—	—	618,8
346	—	—	—	—	—	—	—	615,0
347	—	—	—	—	—	—	—	611,0
348	—	—	—	—	—	—	—	606,9
349	—	—	—	—	—	—	—	602,6
350	—	—	—	—	—	—	—	598,1
351	—	—	—	—	—	—	—	593,4
352	—	—	—	—	—	—	—	588,6
353	—	—	—	—	—	—	—	583,6
354	—	—	—	—	—	—	—	578,4
355	—	—	—	—	—	—	—	573,0
356	—	—	—	—	—	—	—	567,4
357	—	—	—	—	—	—	—	561,7
358	—	—	—	—	—	—	—	555,8
359	—	—	—	—	—	—	—	549,7
360	—	—	—	—	—	—	—	543,5

Таблица П14-5-2

Плотность водяного пара, кг/м³

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C						
		100	110	120	130	140	150	160
1,0	99,09	0,5779	0,5618	0,5467	0,5325	0,5190	0,5063	0,4942
1,1	101,76	—	0,6188	0,6020	0,5865	0,5714	0,5574	0,5441
1,2	104,25	—	0,6761	0,6575	0,6402	0,6242	0,6086	0,5938
1,3	106,56	—	0,7331	0,7133	0,6944	0,6766	0,6596	0,6439
1,4	108,74	—	0,7911	0,7692	0,7485	0,7294	0,7112	0,6940
1,5	110,79	—	—	0,8251	0,8032	0,7825	0,7628	0,7440
1,6	112,73	—	—	0,8810	0,8576	0,8354	0,8143	0,7943
1,7	114,57	—	—	0,9372	0,9124	0,8881	0,8658	0,8446
1,8	116,33	—	—	0,9938	0,9668	0,9416	0,9174	0,8952
1,9	118,01	—	—	1,0504	1,0216	0,9947	0,9695	0,9452
2,0	119,62	—	—	1,107	1,077	1,0481	1,021	0,9960
2,1	121,16	—	—	—	1,132	1,102	1,073	1,047
2,2	122,64	—	—	—	1,187	1,155	1,125	1,097
2,3	124,07	—	—	—	1,242	1,209	1,178	1,148
2,4	125,46	—	—	—	1,298	1,263	1,230	1,199
2,5	126,79	—	—	—	1,354	1,317	1,282	1,250
2,6	128,08	—	—	—	1,409	1,371	1,335	1,301
2,7	129,33	—	—	—	1,465	1,425	1,388	1,352
2,8	130,55	—	—	—	—	1,480	1,440	1,404
2,9	131,73	—	—	—	—	1,534	1,493	1,455
3,0	132,88	—	—	—	—	1,588	1,546	1,506
3,2	135,08	—	—	—	—	1,698	1,652	1,609
3,4	137,18	—	—	—	—	1,808	1,759	1,713
3,6	139,18	—	—	—	—	1,919	1,866	1,816
3,8	141,09	—	—	—	—	—	1,973	1,921
4,0	142,92	—	—	—	—	—	2,081	2,025
4,2	144,68	—	—	—	—	—	2,190	2,130
4,4	146,38	—	—	—	—	—	2,298	2,236
4,6	148,01	—	—	—	—	—	2,408	2,341
4,8	149,59	—	—	—	—	—	2,518	2,447
5,0	151,11	—	—	—	—	—	—	2,554
5,5	154,72	—	—	—	—	—	—	2,822
6,0	158,08	—	—	—	—	—	—	3,094
6,5	161,22	—	—	—	—	—	—	—
7,0	164,17	—	—	—	—	—	—	—
7,5	166,96	—	—	—	—	—	—	—
8,0	169,61	—	—	—	—	—	—	—
8,5	172,12	—	—	—	—	—	—	—
9,0	174,53	—	—	—	—	—	—	—
9,5	176,83	—	—	—	—	—	—	—
10,0	179,04	—	—	—	—	—	—	—
11	183,20	—	—	—	—	—	—	—
12	187,08	—	—	—	—	—	—	—
13	190,71	—	—	—	—	—	—	—

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 170	180	190	200	210	220	230
1,0	—	0,4827	0,4718	0,4613	0,4514	0,4418	0,4327	0,4240
1,1	—	0,5313	0,5192	0,5079	0,4968	0,4864	0,4762	0,4666
1,2	—	0,5800	0,5669	0,5543	0,5423	0,5308	0,5198	0,5092
1,3	—	0,6289	0,6146	0,6006	0,5875	0,5754	0,5634	0,5519
1,4	—	0,6775	0,6622	0,6472	0,6333	0,6196	0,6068	0,5945
1,5	—	0,7267	0,7097	0,6940	0,6788	0,6644	0,6506	0,6373
1,6	—	0,7758	0,7576	0,7407	0,7246	0,7092	0,6940	0,6798
1,7	—	0,8244	0,8058	0,7874	0,7704	0,7536	0,7380	0,7225
1,8	—	0,8734	0,8532	0,8340	0,8157	0,7981	0,7819	0,7657
1,9	—	0,9225	0,9017	0,8810	0,8613	0,8432	0,8251	0,8084
2,0	—	0,9722	0,9497	0,9276	0,9074	0,8881	0,8696	0,8511
2,1	—	1,0214	0,9976	0,9749	0,9533	0,9328	0,9132	0,8944
2,2	—	1,071	1,046	1,022	0,9993	0,9776	0,9570	0,9372
2,3	—	1,120	1,094	1,069	1,045	1,023	1,001	0,9803
2,4	—	1,170	1,142	1,116	1,091	1,068	1,045	1,023
2,5	—	1,220	1,191	1,163	1,137	1,113	1,089	1,066
2,6	—	1,269	1,239	1,210	1,183	1,158	1,133	1,110
2,7	—	1,319	1,288	1,258	1,230	1,203	1,177	1,153
2,8	—	1,369	1,336	1,305	1,276	1,248	1,221	1,196
2,9	—	1,419	1,385	1,353	1,322	1,293	1,266	1,239
3,0	—	1,469	1,433	1,400	1,369	1,338	1,310	1,282
3,2	—	1,569	1,531	1,495	1,461	1,429	1,398	1,369
3,4	—	1,670	1,629	1,591	1,554	1,520	1,487	1,456
3,6	—	1,770	1,727	1,686	1,647	1,611	1,576	1,542
3,8	—	1,872	1,825	1,782	1,741	1,702	1,665	1,630
4,0	—	1,973	1,924	1,878	1,834	1,793	1,754	1,717
4,2	—	2,075	2,023	1,975	1,929	1,885	1,844	1,804
4,4	—	2,177	2,123	2,071	2,023	1,977	1,933	1,892
4,6	—	2,280	2,222	2,168	2,117	2,069	2,023	1,979
4,8	—	2,383	2,322	2,265	2,211	2,161	2,113	2,067
5,0	—	2,486	2,422	2,362	2,306	2,253	2,203	2,155
5,5	—	2,746	2,674	2,607	2,544	2,485	2,429	2,376
6,0	—	3,008	2,927	2,853	2,783	2,718	2,656	2,597
6,5	—	3,272	3,184	3,102	3,025	2,952	2,884	2,820
7,0	—	3,539	3,441	3,351	3,267	3,188	3,113	3,043
7,5	—	3,808	3,701	3,602	3,511	3,425	3,344	3,268
8,0	—	4,080	3,964	3,856	3,757	3,663	3,576	3,494
8,5	—	—	4,228	4,112	4,003	3,903	3,810	3,720
9,0	—	—	4,494	4,369	4,252	4,144	4,044	3,949
9,5	—	—	4,764	4,627	4,502	4,388	4,279	4,177
10,0	—	—	5,038	4,890	4,755	4,632	4,517	4,407
11	—	—	—	5,420	5,266	5,126	4,995	4,871
12	—	—	—	5,959	5,784	5,624	5,476	5,342
13	—	—	—	—	6,313	6,131	5,967	5,814

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 240	250	260	270	280	290	300
1,0	—	0,4156	0,4075	0,3998	0,3923	0,3852	0,3784	0,3716
1,1	—	0,4572	0,4484	0,4399	0,4318	0,4239	0,4161	0,4088
1,2	—	0,4990	0,4895	0,4801	0,4710	0,4625	0,4541	0,4462
1,3	—	0,5408	0,5302	0,5203	0,5105	0,5012	0,4921	0,4836
1,4	—	0,5828	0,5714	0,5605	0,5501	0,5400	0,5302	0,5208
1,5	—	0,6246	0,6124	0,6006	0,5893	0,5787	0,5682	0,5580
1,6	—	0,6667	0,6536	0,6410	0,6289	0,6173	0,6061	0,5956
1,7	—	0,7082	0,6944	0,6812	0,6684	0,6562	0,6443	0,6329
1,8	—	0,7502	0,7358	0,7215	0,7077	0,6949	0,6821	0,6702
1,9	—	0,7924	0,7770	0,7616	0,7474	0,7337	0,7205	0,7077
2,0	—	0,8340	0,8177	0,8019	0,7874	0,7728	0,7587	0,7452
2,1	—	0,8764	0,8591	0,8425	0,8264	0,8117	0,7968	0,7825
2,2	—	0,9183	0,9001	0,8834	0,8666	0,8503	0,8347	0,8197
2,3	—	0,9605	0,9416	0,9234	0,9058	0,8889	0,8726	0,8576
2,4	—	1,003	0,9828	0,9639	0,9452	0,9276	0,9107	0,8953
2,5	—	1,045	1,024	1,004	0,9853	0,9669	0,9497	0,9328
2,6	—	1,087	1,065	1,045	1,025	1,006	0,9876	0,9699
2,7	—	1,129	1,107	1,085	1,065	1,045	1,026	1,007
2,8	—	1,172	1,148	1,126	1,104	1,084	1,064	1,045
2,9	—	1,214	1,190	1,166	1,144	1,123	1,102	1,083
3,0	—	1,256	1,231	1,207	1,184	1,162	1,141	1,120
3,2	—	1,341	1,314	1,288	1,264	1,240	1,217	1,195
3,4	—	1,426	1,397	1,370	1,344	1,318	1,294	1,271
3,6	—	1,511	1,480	1,451	1,423	1,397	1,371	1,346
3,8	—	1,596	1,564	1,533	1,504	1,475	1,448	1,422
4,0	—	1,681	1,647	1,615	1,584	1,554	1,525	1,497
4,2	—	1,767	1,731	1,697	1,664	1,632	1,602	1,573
4,4	—	1,852	1,815	1,778	1,744	1,711	1,679	1,648
4,6	—	1,938	1,898	1,860	1,824	1,790	1,756	1,724
4,8	—	2,024	1,983	1,943	1,905	1,868	1,834	1,800
5,0	—	2,110	2,066	2,025	1,985	1,947	1,911	1,876
5,5	—	2,326	2,277	2,231	2,187	2,145	2,105	2,066
6,0	—	2,542	2,489	2,438	2,390	2,344	2,299	2,257
6,5	—	2,759	2,701	2,646	2,593	2,543	2,494	2,447
7,0	—	2,977	2,914	2,854	2,797	2,742	2,690	2,640
7,5	—	3,195	3,128	3,063	3,001	2,942	2,886	2,832
8,0	—	3,416	3,343	3,273	3,206	3,143	3,083	3,024
8,5	—	3,638	3,559	3,484	3,413	3,344	3,280	3,218
9,0	—	3,860	3,775	3,695	3,619	3,546	3,477	3,411
9,5	—	4,082	3,992	3,908	3,826	3,750	3,675	3,605
10,0	—	4,307	4,210	4,120	4,034	3,953	3,874	3,799
11	—	4,757	4,649	4,548	4,452	4,361	4,274	4,191
12	—	5,214	5,092	4,980	4,873	4,771	4,675	4,588
13	—	5,672	5,540	5,414	5,297	5,184	5,079	4,978

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 310	320	330	340	350	360	370
1,0	—	0,3652	0,3589	0,3530	0,3472	0,3415	0,3361	0,3309
1,1	—	0,4018	0,3949	0,3884	0,3820	0,3758	0,3698	0,3640
1,2	—	0,4384	0,4310	0,4237	0,4168	0,4100	0,4036	0,3972
1,3	—	0,4751	0,4671	0,4591	0,4517	0,4442	0,4372	0,4303
1,4	—	0,5118	0,5030	0,4946	0,4864	0,4785	0,4708	0,4636
1,5	—	0,5485	0,5391	0,5299	0,5214	0,5128	0,5045	0,4968
1,6	—	0,5851	0,5750	0,5656	0,5562	0,5470	0,5385	0,5299
1,7	—	0,6219	0,6112	0,6010	0,5910	0,5814	0,5721	0,5631
1,8	—	0,6588	0,6472	0,6365	0,6258	0,6158	0,6061	0,5963
1,9	—	0,6954	0,6835	0,6720	0,6609	0,6502	0,6398	0,6297
2,0	—	0,7321	0,7194	0,7072	0,6959	0,6845	0,6734	0,6627
2,1	—	0,7686	0,7559	0,7429	0,7305	0,7189	0,7072	0,6959
2,2	—	0,8058	0,7918	0,7782	0,7657	0,7530	0,7407	0,7294
2,3	—	0,8425	0,8278	0,8143	0,8006	0,7874	0,7746	0,7628
2,4	—	0,8795	0,8643	0,8496	0,8354	0,8217	0,8084	0,7962
2,5	—	0,9158	0,9001	0,8850	0,8703	0,8562	0,8425	0,8292
2,6	—	0,9533	0,9363	0,9208	0,9058	0,8905	0,8764	0,8628
2,7	—	0,9898	0,9728	0,9560	0,9407	0,9251	0,9099	0,8961
2,8	—	1,027	1,009	0,9919	0,9754	0,9597	0,9443	0,9294
2,9	—	1,064	1,045	1,028	1,010	0,9938	0,9779	0,9625
3,0	—	1,100	1,082	1,063	1,045	1,028	1,012	0,9957
3,2	—	1,174	1,154	1,134	1,116	1,097	1,080	1,062
3,4	—	1,248	1,227	1,206	1,186	1,166	1,147	1,129
3,6	—	1,322	1,299	1,277	1,256	1,235	1,215	1,196
3,8	—	1,396	1,372	1,349	1,326	1,304	1,283	1,263
4,0	—	1,471	1,445	1,420	1,396	1,373	1,351	1,330
4,2	—	1,545	1,518	1,492	1,467	1,443	1,419	1,397
4,4	—	1,619	1,591	1,564	1,537	1,512	1,487	1,463
4,6	—	1,693	1,664	1,635	1,608	1,581	1,555	1,531
4,8	—	1,768	1,737	1,707	1,678	1,650	1,624	1,598
5,0	—	1,843	1,810	1,779	1,749	1,720	1,692	1,665
5,5	—	2,029	1,993	1,959	1,926	1,894	1,862	1,832
6,0	—	2,216	2,177	2,139	2,103	2,067	2,033	2,001
6,5	—	2,404	2,361	2,320	2,280	2,242	2,205	2,169
7,0	—	2,591	2,545	2,501	2,458	2,417	2,376	2,338
7,5	—	2,780	2,730	2,682	2,636	2,591	2,548	2,507
8,0	—	2,968	2,915	2,864	2,814	2,766	2,720	2,676
8,5	—	3,158	3,101	3,046	2,993	2,942	2,893	2,846
9,0	—	3,348	3,286	3,228	3,172	3,118	3,066	3,016
9,5	—	3,537	3,473	3,411	3,351	3,294	3,238	3,186
10,0	—	3,729	3,660	3,594	3,531	3,471	3,412	3,356
11	—	4,112	4,036	3,962	3,893	3,824	3,759	3,697
12	—	4,496	4,411	4,331	4,254	4,181	4,108	4,040
13	—	4,883	4,789	4,701	4,617	4,537	4,458	4,384

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C						
		380	390	400	410	420	430	440
1,0	—	0,3258	0,3208	0,3161	—	—	—	—
1,1	—	0,3584	0,3530	0,3477	—	—	—	—
1,2	—	0,3911	0,3852	0,3794	—	—	—	—
1,3	—	0,4237	0,4174	0,4110	—	—	—	—
1,4	—	0,4564	0,4494	0,4427	—	—	—	—
1,5	—	0,4890	0,4817	0,4744	—	—	—	—
1,6	—	0,5216	0,5139	0,5061	—	—	—	—
1,7	—	0,5543	0,5461	0,5379	—	—	—	—
1,8	—	0,5872	0,5780	0,5695	—	—	—	—
1,9	—	0,6200	0,6105	0,6013	—	—	—	—
2,0	—	0,6527	0,6427	0,6329	—	—	—	—
2,1	—	0,6854	0,6748	0,6649	—	—	—	—
2,2	—	0,7179	0,7072	0,6964	—	—	—	—
2,3	—	0,7508	0,7391	0,7283	—	—	—	—
2,4	—	0,7837	0,7716	0,7599	—	—	—	—
2,5	—	0,8163	0,8039	0,7918	—	—	—	—
2,6	—	0,8489	0,8361	0,8237	—	—	—	—
2,7	—	0,8818	0,8681	0,8554	—	—	—	—
2,8	—	0,9149	0,9009	0,8873	—	—	—	—
2,9	—	0,9470	0,9328	0,9191	—	—	—	—
3,0	—	0,9802	0,9652	0,9507	—	—	—	—
3,2	—	1,046	1,030	1,014	—	—	—	—
3,4	—	1,112	1,095	1,078	—	—	—	—
3,6	—	1,177	1,159	1,142	—	—	—	—
3,8	—	1,243	1,224	1,205	—	—	—	—
4,0	—	1,309	1,289	1,269	—	—	—	—
4,2	—	1,375	1,354	1,333	—	—	—	—
4,4	—	1,440	1,418	1,397	—	—	—	—
4,6	—	1,506	1,483	1,461	—	—	—	—
4,8	—	1,573	1,548	1,525	—	—	—	—
5,0	—	1,638	1,613	1,589	—	—	—	—
5,5	—	1,804	1,776	1,749	1,722	1,697	1,672	1,648
6,0	—	1,969	1,938	1,909	1,880	1,852	1,825	1,799
6,5	—	2,135	2,101	2,069	2,038	2,008	1,978	1,950
7,0	—	2,300	2,264	2,230	2,196	2,164	2,132	2,101
7,5	—	2,467	2,428	2,391	2,355	2,319	2,285	2,252
8,0	—	2,633	2,592	2,552	2,513	2,475	2,439	2,404
8,5	—	2,800	2,756	2,713	2,672	2,632	2,593	2,555
9,0	—	2,966	2,920	2,874	2,830	2,788	2,747	2,707
9,5	—	3,134	3,084	3,036	2,990	2,945	2,901	2,859
10,0	—	3,301	3,249	3,198	3,149	3,102	3,055	3,011
11	—	3,636	3,579	3,522	3,469	3,415	3,365	3,316
12	—	3,973	3,909	3,848	3,788	3,731	3,675	3,621
13	—	4,310	4,241	4,174	4,110	4,047	3,986	3,926

Продолжение табл. П14-5-2

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C						
		450	460	470	480	490	500	510
1,0	—	—	—	—	—	—	—	—
1,1	—	—	—	—	—	—	—	—
1,2	—	—	—	—	—	—	—	—
1,3	—	—	—	—	—	—	—	—
1,4	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	—	—	—	—	—	—	—	—
1,6	—	—	—	—	—	—	—	—
1,7	—	—	—	—	—	—	—	—
1,8	—	—	—	—	—	—	—	—
1,9	—	—	—	—	—	—	—	—
2,0	—	—	—	—	—	—	—	—
2,1	—	—	—	—	—	—	—	—
2,2	—	—	—	—	—	—	—	—
2,3	—	—	—	—	—	—	—	—
2,4	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	—	—	—	—	—	—	—	—
2,6	—	—	—	—	—	—	—	—
2,7	—	—	—	—	—	—	—	—
2,8	—	—	—	—	—	—	—	—
2,9	—	—	—	—	—	—	—	—
3,0	—	—	—	—	—	—	—	—
3,2	—	—	—	—	—	—	—	—
3,4	—	—	—	—	—	—	—	—
3,6	—	—	—	—	—	—	—	—
3,8	—	—	—	—	—	—	—	—
4,0	—	—	—	—	—	—	—	—
4,2	—	—	—	—	—	—	—	—
4,4	—	—	—	—	—	—	—	—
4,6	—	—	—	—	—	—	—	—
4,8	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	—	1,625	1,602	1,580	1,559	1,538	1,518	—
6,0	—	1,774	1,749	1,725	1,701	1,679	1,657	—
6,5	—	1,922	1,895	1,869	1,844	1,819	1,795	—
7,0	—	2,071	2,042	2,014	1,986	1,960	1,934	—
7,5	—	2,220	2,189	2,159	2,129	2,101	2,073	—
8,0	—	2,370	2,336	2,304	2,272	2,242	2,212	—
8,5	—	2,519	2,483	2,449	2,415	2,383	2,351	—
9,0	—	2,668	2,631	2,594	2,559	2,524	2,491	—
9,5	—	2,818	2,778	2,740	2,702	2,665	2,630	—
10,0	—	2,967	2,926	2,885	2,846	2,807	2,769	—
11	—	3,268	3,222	3,177	3,133	3,090	3,049	—
12	—	3,569	3,517	3,469	3,420	3,374	3,329	—
13	—	3,870	3,814	3,761	3,709	3,658	3,609	—

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 190	200	210	220	230	240	250
14	194,13	—	6,845	6,644	6,460	6,293	6,135	5,992
15	197,36	—	7,391	7,168	6,964	6,775	6,605	6,443
16	200,43	—	—	7,698	7,474	7,267	7,077	6,901
17	203,35	—	—	8,237	7,987	7,764	7,559	7,364
18	206,14	—	—	8,780	8,511	8,264	8,039	7,837
19	208,82	—	—	9,337	9,042	8,772	8,532	8,306
20	211,38	—	—	—	9,578	9,285	9,025	8,780
21	213,85	—	—	—	10,13	9,810	9,524	9,268
22	216,23	—	—	—	10,68	10,34	10,03	9,750
23	218,53	—	—	—	11,25	10,88	10,54	10,24
24	220,75	—	—	—	—	11,42	11,06	10,74
25	222,90	—	—	—	—	11,97	11,59	11,24
26	224,99	—	—	—	—	12,53	12,12	11,75
27	227,01	—	—	—	—	13,11	12,66	12,26
28	228,98	—	—	—	—	13,69	13,21	12,79
29	230,89	—	—	—	—	—	13,77	13,31
30	232,76	—	—	—	—	—	14,33	13,85
31	234,57	—	—	—	—	—	14,90	14,39
32	236,34	—	—	—	—	—	15,49	14,94
33	238,07	—	—	—	—	—	16,08	15,49
34	239,76	—	—	—	—	—	16,68	16,06
35	241,42	—	—	—	—	—	—	16,63
36	243,04	—	—	—	—	—	—	17,21
37	244,62	—	—	—	—	—	—	17,81
38	246,17	—	—	—	—	—	—	18,41
39	247,69	—	—	—	—	—	—	19,02
40	249,18	—	—	—	—	—	—	19,64
41	250,64	—	—	—	—	—	—	—
42	252,07	—	—	—	—	—	—	—
43	253,48	—	—	—	—	—	—	—
44	254,87	—	—	—	—	—	—	—
45	256,23	—	—	—	—	—	—	—
46	257,56	—	—	—	—	—	—	—
47	258,88	—	—	—	—	—	—	—
48	260,17	—	—	—	—	—	—	—
49	261,45	—	—	—	—	—	—	—
50	262,70	—	—	—	—	—	—	—
52	265,15	—	—	—	—	—	—	—
54	267,53	—	—	—	—	—	—	—
56	269,84	—	—	—	—	—	—	—
58	272,10	—	—	—	—	—	—	—
60	274,29	—	—	—	—	—	—	—
62	276,43	—	—	—	—	—	—	—
64	278,51	—	—	—	—	—	—	—

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 260	270	280	290	300	310	320
14	—	5,851	5,724	5,602	5,485	5,376	5,271	5,171
15	—	6,293	6,154	6,020	5,893	5,774	5,662	5,552
16	—	6,738	6,588	6,443	6,305	6,177	6,053	5,935
17	—	7,189	7,022	6,868	6,720	6,579	6,447	6,321
18	—	7,645	7,463	7,294	7,138	6,988	6,845	6,711
19	—	8,097	7,905	7,728	7,559	7,396	7,241	7,097
20	—	8,562	8,354	8,157	7,974	7,806	7,645	7,491
21	—	9,025	8,803	8,598	8,403	8,217	8,045	7,886
22	—	9,497	9,259	9,033	8,826	8,636	8,453	8,278
23	—	9,968	9,714	9,479	9,259	9,058	8,857	8,681
24	—	10,45	10,18	9,926	9,694	9,479	9,268	9,074
25	—	10,93	10,64	10,38	10,13	9,903	9,682	9,479
26	—	11,42	11,11	10,83	10,57	10,33	10,10	9,882
27	—	11,91	11,59	11,29	11,01	10,76	10,52	10,29
28	—	12,41	12,07	11,75	11,46	11,19	10,93	10,70
29	—	12,91	12,55	12,21	11,91	11,62	11,36	11,11
30	—	13,42	13,04	12,68	12,36	12,06	11,78	11,52
31	—	13,94	13,53	13,16	12,82	12,50	12,21	11,93
32	—	14,46	14,02	13,64	13,28	12,95	12,64	12,35
33	—	14,98	14,53	14,12	13,74	13,39	13,07	12,77
34	—	15,52	15,04	14,60	14,21	13,84	13,51	13,19
35	—	16,06	15,55	15,09	14,68	14,30	13,95	13,62
36	—	16,61	16,07	15,59	15,15	14,76	14,39	14,05
37	—	17,16	16,59	16,09	15,63	15,22	14,83	14,48
38	—	17,72	17,12	16,59	16,11	15,68	15,28	14,91
39	—	18,29	17,66	17,10	16,60	16,15	15,73	15,34
40	—	18,87	18,20	17,62	17,09	16,62	16,18	15,78
41	—	19,46	18,75	18,14	17,59	17,09	16,64	16,22
42	—	20,05	19,31	18,66	18,09	17,57	17,10	16,67
43	—	20,65	19,87	19,20	18,59	18,05	17,56	17,11
44	—	21,27	20,45	19,74	19,11	18,54	18,03	17,56
45	—	21,89	21,03	20,28	19,62	19,03	18,50	18,01
46	—	22,53	21,61	20,83	20,14	19,53	18,98	18,47
47	—	23,17	22,21	21,39	20,66	20,03	19,45	18,93
48	—	—	22,81	21,95	21,20	20,53	19,93	19,39
49	—	—	23,42	22,52	21,73	21,04	20,42	19,85
50	—	—	24,05	23,09	22,28	21,55	20,91	20,32
52	—	—	25,33	24,28	23,38	22,59	21,90	21,27
54	—	—	26,64	25,48	24,50	23,66	22,90	22,23
56	—	—	28,02	26,73	25,66	24,74	23,93	23,20
58	—	—	—	28,02	26,85	25,85	24,97	24,19
60	—	—	—	29,34	28,06	26,98	26,03	25,20
62	—	—	—	30,72	29,31	28,13	27,11	26,22
64	—	—	—	32,14	30,59	29,31	28,22	27,26

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 330	340	350	360	370	380	390
14	—	5,074	4,983	4,895	4,810	4,728	4,651	4,575
15	—	5,450	5,350	5,255	5,163	5,074	4,990	4,909
16	—	5,824	5,718	5,615	5,516	5,423	5,330	5,244
17	—	6,203	6,086	5,977	5,872	5,770	5,672	5,580
18	—	6,583	6,460	6,341	6,227	6,120	6,017	5,917
19	—	6,964	6,831	6,707	6,588	6,468	6,361	6,254
20	—	7,342	7,205	7,072	6,944	6,821	6,707	6,592
21	—	7,728	7,582	7,440	7,305	7,174	7,052	6,930
22	—	8,117	7,962	7,812	7,669	7,530	7,396	7,273
23	—	8,503	8,340	8,183	8,032	7,886	7,746	7,616
24	—	8,897	8,718	8,554	8,396	8,244	8,097	7,955
25	—	9,285	9,099	8,929	8,757	8,598	8,446	8,299
26	—	9,679	9,488	9,302	9,124	8,961	8,803	8,650
27	—	10,07	9,872	9,679	9,497	9,320	9,158	8,993
28	—	10,47	10,26	10,06	9,866	9,682	9,506	9,337
29	—	10,87	10,65	10,44	10,24	10,05	9,864	9,689
30	—	11,27	11,04	10,82	10,61	10,41	10,22	10,04
31	—	11,68	11,43	11,20	10,98	10,78	10,58	10,39
32	—	12,08	11,83	11,59	11,36	11,14	10,94	10,74
33	—	12,49	12,22	11,98	11,74	11,51	11,30	11,09
34	—	12,90	12,62	12,36	12,12	11,88	11,66	11,45
35	—	13,31	13,03	12,76	12,50	12,25	12,02	11,80
36	—	13,73	13,43	13,15	12,88	12,63	12,39	12,16
37	—	14,14	13,83	13,54	13,26	13,00	12,75	12,52
38	—	14,56	14,24	13,94	13,65	13,38	13,12	12,87
39	—	14,99	14,65	14,33	14,04	13,76	13,49	13,24
40	—	15,41	15,06	14,73	14,43	14,13	13,86	13,60
41	—	15,84	15,47	15,14	14,81	14,52	14,23	13,96
42	—	16,26	15,89	15,54	15,21	14,90	14,60	14,32
43	—	16,69	16,30	15,94	15,60	15,28	14,98	14,69
44	—	17,13	16,72	16,35	16,00	15,67	15,35	15,05
45	—	17,56	17,15	16,76	16,40	16,05	15,73	15,42
46	—	18,00	17,57	17,17	16,80	16,44	16,11	15,79
47	—	18,45	18,00	17,58	17,19	16,83	16,48	16,16
48	—	18,89	18,43	18,00	17,60	17,22	16,87	16,53
49	—	19,33	18,86	18,42	18,00	17,61	17,25	16,90
50	—	19,79	19,29	18,84	18,41	18,01	17,63	17,28
52	—	20,70	20,17	19,68	19,23	18,80	18,41	18,03
54	—	21,62	21,05	20,53	20,06	19,60	19,18	18,79
56	—	22,55	21,95	21,40	20,89	20,42	19,97	19,55
58	—	23,50	22,86	22,27	21,73	21,23	20,76	20,32
60	—	24,45	23,78	23,15	22,58	22,06	21,56	21,10
62	—	25,43	24,70	24,05	23,45	22,88	22,36	21,88
64	—	26,41	25,65	24,95	24,31	23,72	23,17	22,66

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 400	410	420	430	440	450	460
14	—	4,502	4,431	4,363	4,297	4,234	4,172	4,112
15	—	4,829	4,753	4,679	4,608	4,541	4,474	4,409
16	—	5,160	5,076	4,998	4,921	4,850	4,778	4,708
17	—	5,488	5,402	5,316	5,236	5,157	5,081	5,008
18	—	5,821	5,727	5,637	5,549	5,467	5,385	5,308
19	—	6,150	6,053	5,956	5,865	5,777	5,692	5,605
20	—	6,485	6,378	6,277	6,180	6,086	5,995	5,910
21	—	6,817	6,707	6,601	6,498	6,398	6,301	6,211
22	—	7,153	7,037	6,925	6,817	6,711	6,609	6,510
23	—	7,485	7,364	7,246	7,133	7,022	6,916	6,812
24	—	7,825	7,698	7,570	7,452	7,337	7,225	7,117
25	—	8,163	8,026	7,899	7,770	7,651	7,536	7,424
26	—	8,503	8,361	8,224	8,091	7,968	7,843	7,728
27	—	8,842	8,696	8,547	8,410	8,278	8,157	8,032
28	—	9,183	9,025	8,881	8,734	8,598	8,467	8,340
29	—	9,524	9,363	9.208	9,058	8,913	8,780	8,643
30	—	9,864	9,696	9,533	9,381	9,234	9,091	8,953
31	—	10,21	10,03	9,867	9,706	9,551	9,398	9,259
32	—	10,55	10,37	10,20	10,03	9,871	9,715	9,569
33	—	10,90	10,71	10,53	10,36	10,19	10,03	9,875
34	—	11,24	11,05	10,86	10,68	10,51	10,34	10,18
35	—	11,59	11,39	11,20	11,01	10,83	10,66	10,49
36	—	11,94	11,73	11,53	11,34	11,15	10,98	10,81
37	—	12,29	12,07	11,87	11,67	11,48	11,29	11,12
38	—	12,64	12,42	12,20	12,00	11,80	11,61	11,43
39	—	12,99	12,76	12,54	12,33	12,13	11,93	11,74
40	—	13,35	13,11	12,88	12,66	12,45	12,25	12,06
41	—	13,70	13,46	13,22	12,99	12,78	12,57	12,37
42	—	14,06	13,80	13,56	13,33	13,10	12,89	12,68
43	—	14,41	14,15	13,90	13,66	13,43	13,21	13,00
44	—	14,77	14,50	14,24	14,00	13,76	13,53	13,32
45	—	15,13	14,85	14,59	14,33	14,09	13,86	13,63
46	—	15,49	15,20	14,93	14,67	14,42	14,18	13,95
47	—	15,85	15,56	15,28	15,01	14,75	14,50	14,27
48	—	16,21	15,91	15,62	15,35	15,08	14,83	14,59
49	—	16,58	16,26	15,97	15,69	15,42	15,16	14,91
50	—	16,94	16,62	16,32	16,03	15,75	15,48	15,23
52	—	17,67	17,34	17,02	16,71	16,42	16,14	15,87
54	—	18,41	18,06	17,72	17,40	17,09	16,80	16,52
56	—	19,16	18,78	18,43	18,09	17,76	17,46	17,16
58	—	19,90	19,51	19,14	18,78	18,45	18,12	17,82
60	—	20,66	20,25	19,85	19,48	19,13	18,79	18,47
62	—	21,42	20,98	20,58	20,19	19,82	19.46	19,13
64	—	22,18	21,73	21,30	20,89	20,50	20,14	19,79

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 470	480	490	500	510	520	530
14	—	4,054	3,997	3,943	3,890	—	—	—
15	—	4,348	4,286	4,228	4,170	—	—	—
16	—	4,640	4,577	4,513	4,452	—	—	—
17	—	4,936	4,866	4,798	4,735	—	—	—
18	—	5,230	5,157	5,086	5,015	—	—	—
19	—	5,528	5,450	5,373	5,299	—	—	—
20	—	5,824	5,740	5,659	5,583	—	—	—
21	—	6,120	6,031	5,949	5,865	—	—	—
22	—	6,418	6,325	6,238	6,150	—	—	—
23	—	6,716	6,618	6,527	6,435	—	—	—
24	—	7,013	6,911	6,817	6,720	—	—	—
25	—	7,310	7,205	7,102	7,008	—	—	—
26	—	7,610	7,502	7,396	7,294	—	—	—
27	—	7,911	7,800	7,686	7,576	—	—	—
28	—	8,217	8,097	7,981	7,868	—	—	—
29	—	8,518	8,389	8,271	8,150	—	—	—
30	—	8,818	8,688	8,562	8,439	—	—	—
31	—	9,116	8,985	8,857	8,726	—	—	—
32	—	9,425	9,285	9,149	9,017	—	—	—
33	—	9,726	9,578	9,443	9,311	—	—	—
34	—	10,03	9,880	9,736	9,597	—	—	—
35	—	10,33	10,18	10,03	9,887	—	—	—
36	—	10,64	10,48	10,33	10,18	—	—	—
37	—	10,95	10,78	10,62	10,47	—	—	—
38	—	11,25	11,08	10,92	10,76	—	—	—
39	—	11,56	11,39	11,22	11,05	—	—	—
40	—	11,87	11,69	11,51	11,35	—	—	—
41	—	12,18	11,99	11,81	11,64	—	—	—
42	—	12,49	12,29	12,11	11,93	—	—	—
43	—	12,80	12,60	12,41	12,23	—	—	—
44	—	13,11	12,90	12,71	12,52	—	—	—
45	—	13,42	13,21	13,01	12,82	—	—	—
46	—	13,73	13,52	13,31	13,11	—	—	—
47	—	14,04	13,82	13,61	13,41	—	—	—
48	—	14,35	14,13	13,91	13,70	—	—	—
49	—	14,67	14,44	14,21	14,00	—	—	—
50	—	14,98	14,74	14,52	14,30	14,09	13,88	13,69
52	—	15,61	15,36	15,13	14,90	14,67	14,46	14,25
54	—	16,24	15,98	15,74	15,49	15,26	15,04	14,82
56	—	16,88	16,61	16,35	16,10	15,85	15,62	15,39
58	—	17,52	17,24	16,96	16,70	16,44	16,20	15,97
60	—	18,16	17,86	17,58	17,30	17,04	16,79	16,54
62	—	18,80	18,49	18,20	17,91	17,64	17,37	17,12
64	—	19,45	19,13	18,82	18,52	18,23	17,96	17,69

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 540	550	560	570	580	590	600
14	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—
21	—	—	—	—	—	—	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—
24	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—
26	—	—	—	—	—	—	—	—
27	—	—	—	—	—	—	—	—
28	—	—	—	—	—	—	—	—
29	—	—	—	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—	—	—	—
31	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	—	—	—	—
33	—	—	—	—	—	—	—	—
34	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—
36	—	—	—	—	—	—	—	—
37	—	—	—	—	—	—	—	—
38	—	—	—	—	—	—	—	—
39	—	—	—	—	—	—	—	—
40	—	—	—	—	—	—	—	—
41	—	—	—	—	—	—	—	—
42	—	—	—	—	—	—	—	—
43	—	—	—	—	—	—	—	—
44	—	—	—	—	—	—	—	—
45	—	—	—	—	—	—	—	—
46	—	—	—	—	—	—	—	—
47	—	—	—	—	—	—	—	—
48	—	—	—	—	—	—	—	—
49	—	—	—	—	—	—	—	—
50	—	13,50	13,31	13,13	12,96	12,79	12,62	12,46
52	—	14,05	13,86	13,67	13,49	13,31	13,14	12,98
54	—	14,61	14,41	14,21	14,02	13,84	13,66	13,49
56	—	15,17	14,97	14,76	14,56	14,37	14,18	14,00
58	—	15,74	15,52	15,30	15,10	14,90	14,70	14,52
60	—	16,30	16,07	15,85	15,64	15,43	15,23	15,03
62	—	16,87	16,63	16,40	16,18	15,96	15,75	15,55
64	—	17,44	17,19	16,95	16,72	16,49	16,28	16,06

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 290	300	310	320	330	340	350
66	280,55	31,92	30,52	29,34	28,32	27,41	26,60	25,87
68	282,54	33,28	31,77	30,49	29,39	28,43	27,57	26,79
70	284,48	34,70	33,04	31,67	30,50	29,46	28,55	27,71
72	286,39	36,15	34,35	32,87	31,61	30,52	29,54	28,67
74	288,25	37,68	35,70	34,09	32,75	31,59	30,55	29,64
76	290,08	—	37,09	35,36	33,92	32,67	31,58	30,61
78	291,86	—	38,54	36,66	35,10	33,77	32,62	31,60
80	293,62	—	40,03	37,98	36,31	34,90	33,67	32,59
82	295,34	—	41,56	39,35	37,55	36,05	34,75	33,60
84	297,03	—	43,18	40,75	38,83	37,19	35,84	34,63
86	298,69	—	44,84	42,21	40,13	38,42	36,95	35,68
88	300,31	—	—	43,71	41,46	39,64	38,08	36,74
90	301,92	—	—	45,27	42,84	40,88	39,23	37,81
92	303,49	—	—	46,86	44,25	42,14	40,40	38,90
94	305,04	—	—	48,54	45,70	43,44	41,60	40,00
96	306,56	—	—	50,28	47,19	44,78	42,81	41,14
98	308,06	—	—	52,1	48,73	46,15	44,05	42,27
100	309,53	—	—	54,0	50,3	47,55	45,31	43,44
105	313,12	—	—	—	54,6	51,20	48,59	46,45
110	316,58	—	—	—	59,3	55,2	52,1	49,60
115	319,92	—	—	—	64,6	59,5	55,8	52,9
120	323,15	—	—	—	—	64,2	59,7	56,4
125	326,27	—	—	—	—	69,5	64,1	60,1
130	329,30	—	—	—	—	75,6	68,7	64,1
135	332,23	—	—	—	—	—	73,9	68,3
140	335,08	—	—	—	—	—	79,7	72,9
145	337,86	—	—	—	—	—	86,5	77,9
150	340,55	—	—	—	—	—	—	83,4
155	343,18	—	—	—	—	—	—	89,8
160	345,74	—	—	—	—	—	—	97,0
165	348,23	—	—	—	—	—	—	105,6
170	350,66	—	—	—	—	—	—	—
175	353,03	—	—	—	—	—	—	—
180	355,35	—	—	—	—	—	—	—
185	357,61	—	—	—	—	—	—	—
190	359,82	—	—	—	—	—	—	—
195	361,97	—	—	—	—	—	—	—
200	364,08	—	—	—	—	—	—	—
210	368,16	—	—	—	—	—	—	—
220	372,05	—	—	—	—	—	—	—
230	—	—	—	—	—	—	—	—
240	—	—	—	—	—	—	—	—
250	—	—	—	—	—	—	—	—
260	—	—	—	—	—	—	—	—
270	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—	—	—	—	—	—	—	—
290	—	—	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—	—	—	—

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °С	t, °С						
		360	370	380	390	400	410	420
66	—	25,19	24,57	23,99	23,46	22,95	22,48	22,03
68	—	26,08	25,43	24,82	24,25	23,72	23,23	22,76
70	—	26,98	26,29	25,65	25,06	24,51	23,99	23,50
72	—	27,89	27,16	26,49	25,87	25,30	24,75	24,24
74	—	28,80	28,04	27,34	26,70	26,09	25,52	24,99
76	—	29,73	28,93	28,20	27,52	26,89	26,30	25,74
78	—	30,66	29,83	29,06	28,35	27,69	27,08	26,50
80	—	31,62	30,74	29,93	29,19	28,51	27,86	27,26
82	—	32,58	31,66	30,82	30,04	29,33	28,65	28,03
84	—	33,56	32,58	31,71	30,89	30,15	29,45	28,80
86	—	34,54	33,52	32,60	31,75	30,98	30,26	29,58
88	—	35,54	34,47	33,51	32,63	31,82	31,07	30,36
90	—	36,55	35,44	34,42	33,50	32,66	31,88	31,15
92	—	37,58	36,40	35,35	34,39	33,51	32,70	31,94
94	—	38,62	37,38	36,28	35,29	34,38	33,52	32,74
96	—	39,67	38,39	37,23	36,19	35,24	34,36	33,55
98	—	40,75	39,40	38,20	37,11	36,11	35,20	34,35
100	—	41,82	40,42	39,15	38,02	37,00	36,05	35,17
105	—	44,60	43,03	41,63	40,37	39,23	38,20	37,24
110	—	47,51	45,72	44,17	42,77	41,53	40,39	39,34
115	—	50,5	48,52	46,77	45,25	43,88	42,63	41,49
120	—	53,7	51,4	49,48	47,78	46,27	44,92	43,69
125	—	57,0	54,4	52,3	50,4	48,73	47,26	45,91
130	—	60,5	57,6	55,2	53,1	51,3	49,65	48,19
135	—	64,1	60,9	58,2	55,9	53,9	52,1	50,5
140	—	68,1	64,4	61,3	58,8	56,6	54,6	52,9
145	—	72,2	67,9	64,6	61,7	59,3	57,2	55,3
150	—	76,7	71,8	67,9	64,8	62,2	59,8	57,8
155	—	81,5	75,8	71,5	68,0	65,1	62,6	60,4
160	—	86,8	80,1	75,2	71,3	68,1	65,4	63,0
165	—	92,6	84,7	79,2	74,8	71,3	68,3	65,7
170	—	99,1	89,8	83,3	78,4	74,5	71,2	68,4
175	—	106,6	95,1	87,7	82,2	77,9	74,3	71,3
180	—	115,4	101,1	92,4	86,2	81,4	77,5	74,2
185	—	126,4	107,6	97,4	90,4	85,0	80,8	77,2
190	—	—	115,1	102,9	94,8	88,9	84,1	80,3
195	—	—	123,7	108,8	99,5	92,8	87,6	83,4
200	—	—	133,9	115,3	104,5	97,0	91,3	86,7
210	—	—	165,3	130,6	115,7	106,1	99,1	93,5
220	—	—	—	151,1	128,8	116,2	107,5	100,9
230	—	—	—	183,2	144,8	127,8	116,9	108,9
240	—	—	—	—	165,6	141,2	127,2	117,5
250	—	—	—	—	194,9	157,2	138,9	127,0
260	—	—	—	—	242,7	177,0	152,2	137,3
270	—	—	—	—	—	202,4	167,6	148,8
280	—	—	—	—	—	236,1	185,8	161,7
290	—	—	—	—	—	280,3	207,5	176,1
300	—	—	—	—	—	329,7	233,5	192,6

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C						
		430	440	450	460	470	480	490
66	—	21,60	21,20	20,82	20,45	20,10	19,76	19,44
68	—	22,32	21,90	21,50	21,11	20,75	20,40	20,07
70	—	23,04	22,60	22,18	21,79	21,40	21,04	20,70
72	—	23,76	23,30	22,87	22,46	22,06	21,69	21,33
74	—	24,49	24,02	23,56	23,13	22,72	22,33	21,96
76	—	25,22	24,73	24,25	23,81	23,39	22,98	22,59
78	—	25,95	25,44	24,96	24,49	24,06	23,64	23,23
80	—	26,70	26,16	25,66	25,18	24,72	24,29	23,87
82	—	27,44	26,89	26,36	25,87	25,39	24,94	24,52
84	—	28,19	27,62	27,07	26,56	26,07	25,61	25,16
86	—	28,94	28,35	27,78	27,26	26,75	26,27	25,81
88	—	29,71	29,09	28,51	27,96	27,43	26,93	26,46
90	—	30,47	29,82	29,22	28,65	28,11	27,60	27,11
92	—	31,24	30,57	29,95	29,36	28,80	28,27	27,77
94	—	32,01	31,33	30,68	30,08	29,50	28,94	28,42
96	—	32,79	32,08	31,41	30,78	30,18	29,62	29,09
98	—	33,57	32,84	32,14	31,50	30,88	30,30	29,75
100	—	34,36	33,60	32,89	32,22	31,59	30,99	29,52
105	—	36,35	35,54	34,76	34,04	33,36	32,71	32,09
110	—	38,39	37,50	36,66	35,88	35,14	34,45	33,80
115	—	40,45	39,48	38,58	37,74	36,95	36,21	35,51
120	—	42,55	41,51	40,54	39,64	38,79	37,99	37,24
125	—	44,68	43,55	42,52	41,55	40,65	39,79	38,99
130	—	46,86	45,66	44,54	43,50	42,52	41,61	40,75
135	—	49,09	47,78	46,58	45,45	44,42	43,46	42,55
140	—	51,4	49,95	48,66	47,46	46,36	45,33	44,37
145	—	53,7	52,2	50,8	49,50	48,31	47,21	46,19
150	—	56,0	54,4	52,9	51,6	50,3	49,14	48,03
155	—	58,4	56,7	55,1	53,7	52,3	51,1	49,9
160	—	60,9	59,0	57,3	55,8	54,4	53,0	51,8
165	—	63,4	61,4	59,6	57,9	56,4	55,0	53,7
170	—	66,0	63,8	61,9	60,1	58,5	57,0	55,7
175	—	68,6	66,3	64,2	62,3	60,6	59,1	57,6
180	—	71,3	68,8	66,6	64,6	62,8	61,2	59,6
185	—	74,1	71,4	69,1	66,9	65,0	63,2	61,6
190	—	76,9	74,1	71,5	69,2	67,2	65,4	63,6
195	—	79,8	76,8	74,1	71,6	69,5	67,5	65,7
200	—	82,8	79,5	76,6	74,1	71,8	69,7	67,8
210	—	89,0	85,2	82,0	79,0	76,5	74,2	72,1
220	—	95,7	91,2	87,5	84,2	81,4	78,8	76,5
230	—	102,7	97,6	93,3	89,7	86,4	83,5	81,0
240	—	110,2	104,3	99,4	95,2	91,7	88,5	85,6
250	—	118,2	111,4	105,8	101,1	97,1	93,5	90,4
260	—	126,9	118,9	112,5	107,2	102,7	98,8	95,3
270	—	136,3	126,9	119,6	113,6	108,5	104,2	100,4
280	—	146,4	135,5	127,1	120,3	114,6	109.8	105,6
290	—	157,6	144,7	135,0	127,3	121,0	115,6	111,0
300	—	169,8	154,6	143,4	134,7	127,6	121,6	116,5

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 500	510	520	530	540	550	560
66	—	19,13	18,84	18,55	18,27	18,00	17,75	17,50
68	—	19,75	19,44	19,14	18,85	18,58	18,31	18,05
70	—	20,36	20,04	19,73	19,44	19,15	18,88	18,61
72	—	20,98	20,65	20,33	20,02	19,72	19,44	19,16
74	—	21,60	21,25	20,92	20,61	20,30	20,00	19,72
76	—	22,22	21,87	21,52	21,20	20,88	20,57	20,28
78	—	22,85	22,48	22,12	21,79	21,46	21,14	20,84
80	—	23,47	23,09	22,73	22,38	22,04	21,71	21,40
82	—	24,10	23,71	23,33	22,97	22,62	22,29	21,96
84	—	24,73	24,33	23,94	23,56	23,20	22,86	22,52
86	—	25,37	24,95	24,55	24,16	23,79	23,44	23,09
88	—	26,01	25,58	25,16	24,76	24,38	24,01	23,66
90	—	26,64	26,20	25,77	25,36	24,97	24,59	24,22
92	—	27,28	26,82	26,38	25,96	25,56	25,17	24,79
94	—	27,93	27,46	27,00	26,57	26,15	25,75	25,36
96	—	28,58	28,09	27,62	27,17	26,74	26,33	25,93
98	—	29,22	28,72	28,24	27,78	27,34	26,92	26,51
100	—	29,88	29,36	28,87	28,39	27,94	27,50	27,09
105	—	31,52	30,96	30,43	29,92	29,44	28,98	28,53
110	—	33,17	32,57	32,01	31,47	30,95	30,46	29,98
115	—	34,84	34,21	33,60	33,02	32,48	31,95	31,45
120	—	36,52	35,86	35,21	34,60	34,01	33,46	32,92
125	—	38,23	37,51	36,83	36,18	35,56	34,96	34,40
130	—	39,95	39,18	38,46	37,78	37,12	36,50	36,89
135	—	41,68	40,88	40,11	39,39	38,70	38,04	37,40
140	—	43,44	42,59	41,77	41,02	40,27	39,57	38,91
145	—	45,23	44,33	43,46	42,64	41,88	41,14	40,44
150	—	47,01	46,06	45,15	44,29	43,48	42,70	41,98
155	—	48,83	47,82	46,86	45,96	45,11	44,29	43,52
160	—	50,7	49,60	48,59	47,64	46,75	45,89	45,06
165	—	52,5	51,4	50,3	49,33	48,38	47,48	46,64
170	—	54,4	53,2	52,1	51,0	50,05	49,12	48,22
175	—	56,3	55,0	53,9	52,8	51,7	50,7	49,80
180	—	58,2	56,9	55,6	54,5	53,4	52,4	51,4
185	—	60,1	58,8	57,5	56,2	55,1	54,0	53,0
190	—	62,1	60,6	59,3	58,0	56,8	55,7	54,6
195	—	64,1	62,6	61,1	59,8	58,5	57,4	56,3
200	—	66,1	64,5	63,0	61,6	60,3	59,1	57,9
210	—	70,2	68,4	66,8	65,3	63,9	62,5	61,2
220	—	74,3	72,4	70,6	69,0	67,4	66,0	64,6
230	—	78,7	76,6	74,6	72,8	71,1	69,5	68,1
240	—	83,1	80,8	78,6	76,6	74,8	73,2	71,5
250	—	87,6	85,0	82,7	80,6	78,6	76,8	75,1
260	—	92,2	89,4	86,9	84,6	82,5	80,5	78,7
270	—	97,0	94,0	91,2	88,7	86,4	84,2	82,3
280	—	101,9	98,6	95,6	92,8	90,4	88,1	86,0
290	—	106,9	103,3	100,1	97,1	94,5	92,0	89,8
300	—	112,1	108,2	104,7	101,5	98,6	96,0	93,5

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 570	580	590	600
66	—	17,26	17,03	16,80	16,58
68	—	17,81	17,56	17,33	17,10
70	—	18,35	18,10	17,86	17,62
72	—	18,90	18,64	18,39	18,15
74	—	19,44	19,18	18,92	18,67
76	—	19,99	19,72	19,45	19,19
78	—	20,54	20,26	19,98	19,72
80	—	21,09	20,80	20,52	20,24
82	—	21,64	21,34	21,05	20,77
84	—	22,20	21,89	21,59	21,29
86	—	22,76	22,44	22,12	21,82
88	—	23,32	22,98	22,66	22,36
90	—	23,87	23,53	23,20	22,88
92	—	24,43	24,08	23,74	23,42
94	—	24,99	24,63	24,28	23,95
96	—	25,56	25,18	24,83	24,49
98	—	26,12	25,74	25,37	25,02
100	—	26,68	26,30	25,92	25,56
105	—	28,10	27,69	27,29	26,90
110	—	29,52	28,69	28,66	28,26
115	—	30,96	30,50	30,05	29,62
120	—	32,40	31,92	31,44	30,98
125	—	33,86	33,34	32,84	32,36
130	—	35,32	34,77	34,25	33,74
135	—	36,79	36,22	35,66	35,12
140	—	38,28	37,66	37,08	36,52
145	—	39,76	39,12	38,52	37,92
150	—	41,27	40,60	39,95	39,34
155	—	42,77	42,07	41,41	40,75
160	—	44,31	43,57	42,86	41,18
165	—	45,83	45,06	44,33	43,61
170	—	47,37	46,55	45,79	45,06
175	—	48,92	48,08	47,28	46,51
180	—	50,5	49,60	48,76	47,94
185	—	52,1	51,1	50,2	49,43
190	—	53,6	52,7	51,8	50,9
195	—	55,2	54,2	53,3	52,4
200	—	56,8	55,8	54,8	53,9
210	—	60,1	59,0	57,9	56,9
220	—	63,4	62,2	61,0	59,9
230	—	66,7	65,4	64,1	63,0
240	—	70,0	68,6	67,3	66,1
250	—	73,5	72,0	70,6	69,2
260	—	76,9	75,4	73,9	72,4
270	—	80,4	78,7	77,1	75,6
280	—	84,0	82,2	80,4	78,9
290	—	87,6	85,7	83,9	82,2
300	—	91,3	89,2	87,3	85,5

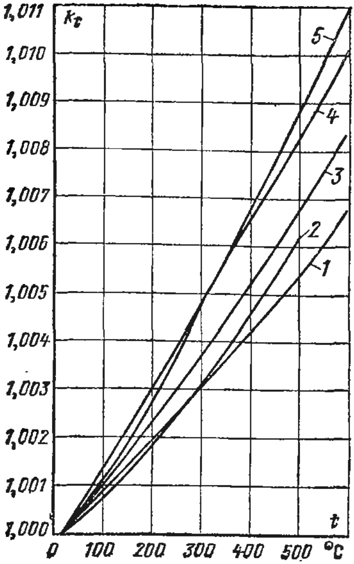
p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 400	410	420	430	440	450	460
310	—	372,6	263,9	211,2	183,2	165,2	152,3	142,4
320	—	405,2	297,7	232,2	197,9	176,6	161,7	150,5
330	—	429,9	331,5	255,6	214,0	188,9	171,8	159,1
340	—	449,2	361,9	280,7	231,6	202,1	182,4	168,0
350	—	465,1	388,0	306,6	250,6	216,3	193,7	177,5
360	—	478,5	409,8	331,8	270,6	231,4	205,6	187,4
370	—	490,0	428,1	355,2	291,1	247,3	218,2	197,7
380	—	500,2	443,7	376,4	311,7	263,8	231,4	208,6
390	—	509,2	457,0	394,9	331,7	280,9	245,1	219,9
400	—	517,3	469,0	411,5	350,5	298,0	259,3	231,5

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 470	480	490	500	510	520	530
310	—	134,4	127,9	122,2	117,4	113,1	109,3	105,9
320	—	141,6	134,3	128,2	122,9	118,2	114,2	110,5
330	—	149,1	141,0	134,3	128,5	123,5	119,1	115,1
340	—	156,9	148,0	140,6	134,3	128,8	124,1	119,8
350	—	165,1	155,2	147,1	140,2	134,4	129,2	124,6
360	—	173,6	162,7	153,8	146,4	140,0	134,5	129,6
370	—	182,4	170,5	160,8	152,7	145,8	139,8	134,6
380	—	191,6	178,5	167,9	159,1	151,7	145,3	139,7
390	—	201,2	186,8	175,3	165,8	157,8	150,9	144,9
400	—	211,1	195,4	182,8	172,6	164,0	156,6	150,2

p, кгс/см²	$t_{нас}$, °C	t, °C 540	550	560	570	580	590	600
310	—	102,9	100,0	97,4	95,1	92,8	90,7	88,8
320	—	107,2	104,1	99,4	98,8	96,4	94,2	92,2
330	—	111,6	108,3	105,4	102,7	100,2	97,8	95,6
340	—	116,0	112,6	109,4	106,5	103,9	101,4	99,1
350	—	120,6	116,9	113,5	110,5	107,7	105,0	102,6
360	—	125,2	121,3	117,7	114,5	111,5	108,7	106,2
370	—	129,9	125,8	122,0	118,5	115,4	112,5	109,8
380	—	134,7	130,3	126,3	122,6	119,3	116,2	113,4
390	—	139,6	134,9	130,6	126,8	123,3	120,0	117,0
400	—	144,6	139,6	135,1	131,0	127,3	123,9	120,7

Рис. П14-6-1. Поправочный множитель k_t на расширение материала сужающего устройства и трубопровода.

1 — 1Х12ВНМФ (ЭИ-802); *2* — Х17, Х17Н2; *3* — сталь 15М, 20, 20М, 12МХ, 15ХМА, 12Х1МФ; *4* — 1Х18Н9Т; *5* — Х23Н13, Х18Н25С2.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М., «Наука», 1969. 576 с.

2. **Маликов М. Ф.** Основы метрологии. М., изд-во «Коммерприбор», 1949. 477 с.

3. **Методы** обработки результатов наблюдений при измерениях. Под ред. Е. П. Широкова «Труды ВНИИМ», вып. 134 (194). М.—Л., Изд-во стандартов, 1972. 116 с.

4. **Тиходеев П. М.** Очерки об исходных измерениях. М.—Л., Машгиз, 1954. 216 с.

5. **Преображенский В. П., Иванова Г. М.** Методика расчета динамических характеристик измерительных систем, включающих манометры и дифманометры. — «Теплоэнергетика», 1968, № 2, с. 72—75.

6. **Бурдун Г. Д., Марков Б. Н.** Основы метрологии. М., Изд-во стандартов, 1972. 317 с.

7. **Долинский Е. Ф.** Обработка результатов измерений. М., Изд-во стандартов, 1973. 316 с.

8. **Балакирев В. С., Дудников Е. Г., Цирлин А. М.** Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. М., «Энергия», 1967. 232 с.

9. **Элементы** расчета систем автоматического регулирования. Под ред. В. В. Волгина. М., МЭИ, 1963. 124 с.

10. **Стефани Е. П.** Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М., «Энергия», 1972. 376 с.

11. **Потенциометры** и уравновешенные мосты автоматические, приборы с токовым входом. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2.556.008 ТО. Изд-во «Челябинский рабочий», 1974. 83 с.

12. **Серьезнов А. Н., Цапенко Н. П.** Методы уменьшения влияния помех в термоэлектрических цепях. М., «Энергия», 1968. 72 с.

13. **Орлова М. П.** Низкотемпературная термометрия. М., Изд-во стандартов, 1975. 160 с.

14. **Преображенский В. П., Иванова Г. М.** К вопросу нормирования динамических характеристик манометров и дифманометров. — «Приборы и схемы управления», 1974, № 8, с. 35—36.
15. **Бувин Н. П., Преображенский В. П.** и др. Динамические характеристики быстродействующих потенциометров КСП4. — «Труды МЭИ», 1972, вып. 136.
16. **Пичугин О. А.** Обеспечение помехоустойчивости автокомпенсатора применением плавающей экранировки. — В кн.: Сборник автоматизации управления электрическими системами и объектами. Л., «Наука», 1968, с. 212—218.
17. **Диденко К. И.** Частотно-ферродинамическая система приборов контроля и управления. М., «Энергия», 1970. 224 с.
18. **Барбила П. И., Киц А. И., Лах В. И.** Новые платиновые термометры сопротивления. — «Измерительная техника», 1964, № 5, с. 19—21.
19. **Самсонов Г. В.** Датчики для измерения температуры в промышленности. Киев, «Наукова думка», 1972. 224 с.
20. **Методические** указания № 242 по градуировке технических полупроводниковых термометров сопротивления в области температур от 100 до 300°С. М., Изд-во стандартов. 1964. 15 с.
21. **Шевтель И. Т.** Основные характеристики и параметры промышленных терморезисторов — термометров сопротивления. — «Приборы и системы управления», 1971, № 9, с. 32—36.
22. **Плащинский Н. Т., Шефтель И. Т.** Новые высокотемпературные терморезисторы. — «Приборы и системы управления», 1971, № 9, с. 36—37.
23. **Нечаев Г. К.** Термосопротивления в температурном контроле. Киев, Гостехиздат УССР, 1959. 206 с.
24. **Нечаев Г. К.** Реле и датчики с полупроводниковыми термосопротивлениями. М., Госэнергоиздат, 1961. 111 с.
25. **Андреев А. А.** Автоматические, показывающие, самопишущие и регулирующие приборы. Л., «Машиностроение», 1973. 287 с.
26. **Гордов А. Н.** Основы пирометрии. М., «Металлургия», 1971. 447 с.
27. **Ярышев Н. А.** Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л., «Энергия», 1967. 229 с.
28. **Преображенский В. П., Лецкас В. Г.** Исследование методических погрешностей при измерении температур контактными методами на ТЭС. — «Труды МЭИ», 1974, вып. 188, с. 65—69.
29. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача. М., «Энергия», 1975. 486 с.
30. **Тювин Ю. Д., Рогельберг И. Л.** Сплавы сильх и силин для термоэлектродов термопар. — «Цветные металлы», 1976, № 4, с. 70—71.
31. **Кноблаух О., Генки К.** Точное измерение температур в технике. ГОНТИ, 1931. 137 с.
32. **Авдуевский В. С., Данилов Ю. И.** и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М., Оборонгиз, 1960. 389 с.
33. **Гухман А. А.** Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассобмена. М., «Высшая школа», 1967. 303 с.
34. **Преображенский В. П.** Теплотехнические измерения и приборы. М., Госэнергоиздат, 1953. 384 с.
35. **Гухман А. А., Илюхин Н. В.** Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью. М., Машгиз, 1951. 227 с.
36. **Илюхин Н. В.** Измерение температуры в потоке газа высокой скорости. — «Теплоэнергетика», 1956, № 2, с. 20—25.
37. **Гордов А. Н.** Измерение температур газовых потоков. М.—Л., Машгиз, 1962. 136 с.
38. **Преображенский В. П., Бувин Н. П.** Измерение температур пульсирующего газового потока. — «Энергомашиностроение», 1964, № 7, с. 38—41.
39. **Преображенский В. П., Чистяков В. С.** Измерение быстроменяющихся температур газового потока при помощи малоинерционных термоприемников. — «Измерительная техника», 1968, № 5, с. 45—48.
40. **Клушин Ю. А., Преображенский В. П.** Динамические характеристики телескопов радиационных пирометров. — «Промышленная энергетика», 1964, № 9, с. 31—33.

41. **Заседателев С. М., Беликов Л. В.** О проектировании датчиков давления с интегральными тензопреобразователями. — «Приборы и системы управления», 1971, № 11, с. 45—48.
42. **Кенигсберг В. Л., Сердюков В. И.** Полупроводниковый датчик давления «Кристалл». — «Приборы и системы управления», 1974, № 7, с. 26—27.
43. **Преображенский В. П., Иванова Г. М.** и др. Динамические характеристики полупроводниковых измерительных преобразователей давления «Кристалл». — «Приборы и системы управления», 1974, № 8, с. 36—38.
44. **Рузга З.** Электрические тензометры сопротивления. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. 336 с.
45. **Востриков Ю. Я.** Анализ метрологии дифференциально-трансформаторной следящей системы. — «Измерительная техника», 1966, № 3, с. 19—24.
46. **Востриков Ю. Я.** Вывод условий метрологической взаимозаменяемости дифференциально-трансформаторных приборов. — «Измерительная техника», 1968, № 10, с. 29—33.
47. **Миронов В. Д., Каплунов И. Б.** и др. Преобразователь механического перемещения плунжера в унифицированный электрический выходной сигнал. А. С. № 282969 (СССР) Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 30, с. 188.
48. **Андреева Л. Е.** Упругие элементы приборов. М., Машгиз, 1962. 455 с.
49. **Данишевский С. К., Ипатова С. И.** и др. Термопары из сплавов молибдена с рением. — «Измерительная техника», 1966, № 4, с. 50—54.
50. **Андреева Л. Е., Богданова Ю. А.** Методы проектирования мембранных упругих элементов (ЦНИИТЭИ приборостроения) М., 1972. 37 с.
51. **Сильфоны,** расчет и проектирование. Под ред. Л. Е. Андреевой. М., «Машиностроение», 1975. 159 с.
52. **Стаднык Б. И., Куритных И. П., Яковенко С. И.** Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной термоэлектрической термометрии.— «Приборы и системы управления», 1971, № 9, с. 16—19.
53. **Федосьев В. И.** Упругие элементы точного приборостроения. М., Оборонгиз, 1949. 343 с.
54. **Самсонов Г. В., Кислый П. С.** Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев, «Наукова думка», 1965. 181 с.
55. **Нагаткин А. Г.** Манометр высокого давления с трубчатой пружиной нового типа. — «Приборостроение», 1956, № 5, с. 13—16.
56. **Миронов В. Д., Николаев Г. В.** и др. Датчики с унифицированным выходным сигналом, основанные на принципе компенсации магнитных потоков. — «Приборы и системы управления», 1974, № 7, с. 27—29.
57. **Преображенский В. П., Панько М. А., Стригнина Л. А.** Об оценке погрешности контактных методов измерения температуры. — «Приборы и системы управления», 1976, № 7, с. 20—22.
58. **Новые** приборы и средства автоматизации. — «Приборы и системы управления», 1974, № 7, с. 31—34.
59. **Кремлевский П. П.** Расходомеры и счетчики количества. Л., «Машиностроение», 1975. 776 с. (изд. 3-е); 1963. 656 с. (изд. 2-е).
60. **Дукарский С. М.** и др. Усовершенствование метода и устройства для измерения температуры чугуна на выпуске из доменной печи. — «Приборы и системы управления», 1971, № 9, с. 27—29.
61. **Правила** 28-64. Измерение жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами. М., Изд-во стандартов, 1964. 148 с.
62. **Вайнштейн А. Л.** К вопросу об измерении расхода вязких сред. — «Измерительная техника», 1959, № 1, с. 58—62.
63. **Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М., Изд-во стандартов, 1969. 408 с.
64. **Свет Д. Я., Заварза Т. Н.** О выборе и рациональном использовании спектральной чувствительности фотоэлементов в бихроматической пирометрии. — «Измерительная техника», 1964, № 2, с. 8—10.
65. **Свет Д. Я., Гришин В. В.** и др. Автоматический пирометр для измерения по излучению истинной температуры металлов. — В кн.: Физико-химические основы производства стали. М., 1971, с. 339—344.

66. **Свет Д. Я.** Об одной форме распределения спектральиой плотности энергии температурного излучения. — «Доклады АН СССР», 1966, т. 170; № 4, с. 825—827.
67. **Свет Д. Я.** Независимость определения излучательной способности по спектру собственного теплового излучения. — «Доклады АН СССР», 1975, т. 221, № 1, с. 81—83.
68. **Свет Д. Я.** Оптимальная пирометрия излучения веществ в твердой и жидкой фазе. — «Доклады АН СССР», 1976, т. 227, № 2, с. 341—343.
69. **Thibessard G.** Ausflussversuche mit Blenden am Ende einer Rohrleitung. — «Brennstoffe-Wärme-Kraft», 8, 1956, 3, S. 116—117.
70. **Sasiadek M.** Untersuchungen über den Einfluss der Doppelblenden auf die notwendige gerade Rohrstrecke, ACTA IMEKO, 1958, III, S. 41—49; «Pomiary, Automatyka, Kontrola», 5, 1959, 7, S. 253—255.
71. **Witte R.** Neue Arbeiten zur Durchflussmessung. BWK, 3, 1951, 11, S. 378—380.
72. **Herning F., Lugt H.** Neue Versuche mit Segmentbleenden und Normblenden. — «Brennstoffe-Wärme-Kraft», 10, 1958, 5, S. 219—223.
73. **Попов С. Г.** Измерение воздушных потоков. М., ОГИЗ—Гостехиздат, 1947. 296 с.
74. **Фингер Е. Д., Бойко Г. Г.** Методика испытаний котельных установок. М.—Л., «Энергия», 1964. 288 с. с ил.
75. **Кашарский Б. Д., Безиовская Т. Х., Бек В. А.** и др. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Изд. 3-е, Л., «Машиностроение», 1976. 485 с.
76. **Расходомер** мазута ТМ1, Руководство по монтажу и эксплуатации, 08-69-1-0.00.00.РЭМ, Баку, СКБнефтехимприбор, 1971. 27 с.
77. **Чистяков С. Ф., Радуи Д. В.** Теплотехнические измерения и приборы. М., «Высшая школа», 1972. 392 с.
78. **Автоматизация** крупных тепловых электростанций. Под ред. М. П. Шальмана. М., «Энергия», 1974. 240 с.
79. **Копченов О. В.** Измерение уровня в барабане котла дифференциальным манометром. — «Электрические станции», 1969, № 5, с. 68—70.
80. **Докучаева Л. Н., Зархин М. М.** и др. Всережимный уровнемер. — «Приборы и системы управления», 1967, № 1, с. 6—7.
81. **Ларионов Д. П., Тарасов В. В.** Опыт наладки уровнемеров паровых котлов. — В кн.: Новые методы измерения на электростанциях и в сетях. М., 1959, с. 10—17.
82. **Музыка Ю. В., Глухоедов Ю. Н.** Унифицированная гамма датчиков реле давления и разности давлений — ГСП. «Приборы и системы управления», № 7, с. 41—42.
83. **Чесаков Л. И., Смирновский А. Г.** Акустический датчик уровня для ГСП. — «Труды института НИИТеплоприбор», 1972, № 78, с. 15—23.
84. **Агейкин Д. И., Костина Е. Н.** и др. Датчики контроля и регулирования. М., «Машиностроение», 1965. 928 с. с ил.
85. **Деянов В. А.** Автоматизация, защита, сигнализация на электростанциях. М., Госэнергоиздат, 1963. 384 с.
86. **Кулаков М. В.** Технологические измерения и приборы для химических производств. М., «Машиностроение», 1974. 462. с.
87. **Гомолов В. М.** Прибор для измерения уровня угольной пыли. — «Электрические станции», 1962, № 5, с. 78—79.
88. **Авдеева А. А., Белосельский Б. С., Краснов М. Н.** Контроль топлива на электростанциях. М., «Энергия», 1973. 384 с.
89. **Павленко В. А.** Газоанализаторы. М.—Л., «Машиностроение», 1965. 296 с.
90. **Агейкин Д. И.** Магнитные газоанализаторы. М., Госэнергоиздат, 1963. 216 с.
91. **Сакодымский К. И.** и др. Приборы для хроматографии. М., «Машиностроение», 1973. 367 с.
92. **Киселев А. В., Яшин Я. И.** Газо-адсорбционная хроматография. М., «Наука», 1967. 256 с.

93. **Айвазов Б. В.** Практическое руководство по хроматографии. М., «Высшая школа», 1968. 279 с.

94. **Авдеева А. А.** Контроль сжигания газового топлива. М., «Энергия», 1971. 256 с.

95. **Живилова Л. М., Ефимов Г. В., Максимов В. В.** Автоматизация водоподготовительных установок тепловых электростанций. М., «Энергия», 1976. 215 с.

96. **Живилова Л. М.** Промышленные и лабораторные приборы химического контроля за водным режимом тепловых электростанций. (Обзор). М., «Информэнерго», 1972, вып. 1 и 2. 65 с. (1); 46 с. (2).

97. **Мостофин А. А.** Электрические солемеры для контроля качества пара и котловой воды. Л.—М., 1951. 152 с.

98. **Преображенский В. П., Жолковский С. М.** Солемеры. М., ГОНТИ, 1939. 64 с.

99. **Преображенский В. П., Панько М. А.** К расчету схемы температурной компенсации при измерении концентрации по электропроводности растворов. — В кн.: Автоматизация химических производств. М., 1968, с. 50—60.

100. **Мостофин А. А., Сорокина Н. С.** Солемеры с дегазацией и обогащением пробы. — «Теплоэнергетика», 1961, № 4, с 85—89.

101. **Мостофин А. А., Сорокина Н. С.** Солемеры ЦКТИ с малогабаритными концентраторами. — «Теплоэнергетика», 1970, № 7, с. 41—44.

102. **Александров А. А.** Международные таблицы и уравнение для динамической вязкости воды и водяного пара. — «Теплоэнергетика», 1977, № 4, с. 87—91.

103. **К вопросу** метрологического обеспечения информационной части АСУ ТП. — «Теплоэнергетика», 1975, № 12, с. 20—23. Авт.: В. П. Преображенский, Н. П. Бувин, Г. М. Иванова и др.

104. **Земельман М. А.** Методический материал по применению ГОСТ 8.009—72 «ГСИ нормируемые метрологические характеристики средств измерений». Из-во стандартов, 1975, 78 с.

А

Автоматическая компенсация изменения термо-э. д. с. (устройство КТ) 135
Автоматический компенсационный прибор для измерения низких температур 230
Автоматический потенциометр безреохордный 187
— — общие сведения 152—156
— — принципиальная схема 160
— — расчет сопротивлений резисторов измерительной схемы 165—170
— — усилитель 160, 171, 174, 176
— — устройство 178—186
— — устройство входное усилителя 160, 172
— — стабилизированный источник питания (ИПС) 160, 178
— — фильтр Г-образный (Ф1) и Т-образный (Ф2) 164, 184
— уравновешенный мост, общие сведения 221, 222
— — — принципиальная схема 225
— — — принципиальные измерительные схемы 222—224
— — — устройство 226—229

Б

Барометр ртутный 360
Биметаллическое температурное реле 85, 86
Бурдона пружина 369—372

В

Вакуумметр 347, 380
Вероятность доверительная 16, 18, 21—23, 25, 30
Вибратор струнный 330

Г

Газоанализаторы магнитные 586—589
— оптические 598—606
— оптико-акустические 600—604
— термокондуктометрические 577—584
— термохимические 584, 585
— химические 574—576
Газовые хроматографы 605—618
— — «Газохром» 3101 614—617
Гистерезис практический 364
Гистерезиса петля 363
Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) 11

Д

Давление абсолютное 347
— вакуумметрическое 347
— избыточное 347
Диафрагма с двойным скосом 493
— сегментная 494
— стандартная 440—444
Динамическая вязкость пара и воды 659, 660
Динамическая погрешность 43
— характеристика средств измерений 43—52
Дистанционная передача 307, 311, 317, 318
Дифманометр см. Манометр дифференциальный
— сильфонный 414—418, 420—422
Дифференциально-трансформаторные преобразователи 305—313

Е

Единицы давления 348
— расхода 433, 434

И

Измерение давления и разности давлений 347—432
— — газов, жидкости и пара 425—432
— — общие методические указания 424, 425
— количества и расхода тепла 526—529
— общие сведения 7—55
— погрешность 13—30, 52—55, 156—159
— расхода и количества жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве 434—498
— — жидкости и газа напорными трубками 498—503
— — общие сведения 433—436
— — погрешность 474—482
— — при малых числах Рейнольдса 489—493
— скорости потока 498—500
— сопротивления термометра мостом 209—213
— состава газов 572—621
— температуры газовых потоков большой скорости 250—255
— — внутри тела 258—260
— — низкой 229—231
— — по тепловому излучению тел 260—297
— — поверхности тела 255—258
— — термоэлектрическим методом 86—188
— термо-э. д. с. 137, 138, 139—144, 146, 160
— уровня воды в барабане 531—544
— — — — конденсаторе, подогревателе и баке 544—548
— — жидкости 530—564
— — сыпучих тел 564—571
— удельной электропроводности водяных растворов 623—628
Источник стабилизированного питания (ИПС) 160, 166, 177, 178

К

Класс точности 30, 31
Компенсационный метод измерения сопротивления термометра 208
— — — термо-э. д. с. 143, 146, 160

Комплексная частотная характеристика (КЧХ) средства измерения 49
Кондуктометр жидкости безэлектродный 636—639
— — с электродным преобразователем 634—636
Контроль качества воды, пара и конденсата 622—646
Коэффициент передачи 38—42
— расхода 437, 447—454, 488, 490, 491, 492, 494

Л

Ламповый электронный усилитель 171 175
Логометры 213—221

М

Мановакуумметр 348, 378, 380, 381, 383
Манометр дифференциальный
— — колокольный 396—400
— — кольцевой 401—404
— — мембранный ДМ, ДМЭ (ДМЭР), ДМИ 410—414
— — пневматический компенсационный сильфонный 420—422
— — — — мембранный 422—424
— — поплавковый 404—409
— — сильфонный 414—417
— — — электрический ДСЭ 417, 418
— — электрический компенсационный 418—420
— мембранный (ММЭ) 384
— пьезоэлектрический 390—393
— с одновитковой трубчатой пружиной 379, 380
— самопишущий (МСС) 378
— сопротивления 393
— U-образный (двухтрубный) 349—351
— установка на трубопроводе 429—432
— чашечный (однотрубный) 351
— электроконтактный 381
Мембрана выпуклая 365, 366
— гофрированная 366, 368
— неметаллическая (вялая) 367, 368
— плоская 365
Методические погрешности при измерении температуры среды 234—245
Механоэлектрический передающий преобразователь (МП-Л) 319
Микроманометры 353—357
Милливольтметры 120—134
— измерительный механизм 126—129
— конструктивные формы 129—134
— переносные 130
— стационарные 130
— — показывающие 131, 132
— — — и самопишущие 130, 133, 134
— схемы присоединения термоэлектрических термометров 135—138
Мосты автоматические уравновешенные 221—229
— — — показывающие 227
— — — — и самопишущие 227

Н

Напоромер (НМП) 375
— сильфонный типа НС-Э 386, 387
Нормальные условия 31, 32, 156
— элементы (НЭ) 144—146

О

Обратная связь 41, 42, 321, 322, 326, 327, 333, 337, 339, 341, 345
Отбор проб газа 618—621
Отборное устройство для измерения давления 426, 427, 428

П

Первичное измерительное устройство (первичный прибор) 11
Первичный преобразователь 10
Передаточная функция 46, 115
Передающий измерительный преобразователь 11, 299, 302, 305, 312, 314, 319, 321, 330
Пирометр оптический 269—274, 277—279
— — лабораторный ОП 275—277
— — ОППИР-017 274, 275
— полного излучения 288—297
— спектрального отношения двухканальный 284
— — — ПИТ-1 285—288
— фотоэлектрический (ФЭП-4) 283
Плотность воды 665—672
— водяного пара 673—690
— газа 661
— среды 458—460
Погрешность измерений 13—30
— — расхода 474—482
— — температуры потенциометром 156—159
— термометров сопротивления 193, 194
— термоэлектрических термометров 101
Поправка 37
— на температуру свободных концов термоэлектрического термометра 95, 96
Потенциометр автоматический 152—188
— — безреохордный 186—188
— — показывающий 179—181
— — — и самопишущий 181—186
Преобразователь дифференциально-трансформаторный 305—313
— емкостный для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей 551—554
— — — — — электропроводных жидкостей 554—556
— измерительный 10
— — механоэлектрический (МП-Л) 319 320
— — нормирующий (промежуточный) для работы с термоэлектрическим термометром 341—344
— — — — — — — термометром сопротивления 344—346
— — пневматический передающий 335—338
— — реостатный 290—302
— — с магнитной компенсацией 321—325
— пневмосиловой 332—335
— пневмоэлектрический 340, 341
— тахометрический 509—511
— ферродинамический 314—319
— частотный со струнным вибратором 329—332
— электродный кондуктометрический 628—635
— электропневматический (ЭПП-М) 338, 339
— электросиловой 325—327
Прибор давления прямого действия 10 374—380
— измерительный показывающий 10
— — интегрирующий 10
— электроконтактный 381, 382
Промежуточное измерительное устройство 11

Р

Разделители жидкостные и мембранные 431, 432
Расходомеры 503
— тахометрические 509, 510, 516—520
— электромагнитные 520—526
Реле давления 381, 382
— температуры РТ-300 85, 86

Реостатный преобразователь 299—302
Реперные точки МПТШ-68 64
Ротаметры 504—508

С

Свойства газа 661
Сигнализаторы уровня сыпучих тел 566—568
Сильфоны 368, 369
Сопло 444, 445
— Вентури 435, 445, 446
Статическая характеристика 38
Структурная схема 40—42
Сужающее устройство 440—446
— — диафрагма 434—436, 440—444
— — коэффициент расхода 447—454
— — расчет 482—487
— — сопло 434—436, 444, 445, 496—498
— — схемы соединительных линий 466—474
— — установка 463—466
Счетчики объемные 514—516
— скоростные 511—514

Т

Температура радиационная 219
— свободных концов термоэлектрических термометров 95, 96, 119, 120
— цветовая 267—269
— шкала 61—64
— яркостная 267
Тензопреобразователь 302—305
Тепломер 527—529
Термометр биметаллический 84, 85
— дилатометрический 84
— манометрический 75—84
— — газовый 79, 80
— — жидкостный 82, 83
— — конденсационный 80—82
— спопротивления 188—213
— — медный (ТСМ) 194, 196, 245
— — — градуировочная таблица 655
— — никелевый 196
— — платиновый (ТСП) 191—194
— — — градуировочная таблица 653, 654
— — полупроводниковый см. Терморезистор
— — устройство 197—203
— стеклянный жидкостный 65—68
— — ртутный 68—75
— — — лабораторный 68
— — — технический 70—75
— термоэлектрический 86—120, 246—250, 256
— — медь-константановый (ТМК) 107
— — платинородий-платиновый (ПП) 99—104
— — — градуировочная таблица 649—653
— — платинородий-платинородиевый (ТПР) 104
— — — градуировочная таблица 650
— — устройство 110—112
— — хромель-алюмелевый (ТХА) 106, 107
— — — градуировочная таблица 651
— — хромель-копелевый 106, 107
— — — градуировочная таблица 652
Термоприемник идеализированный 239, 241
— установка в трубопроводе 236
— — вертикальная 246, 248
— — горизонтальная 247, 249
— — на трубопроводе 234, 258
Терморезисторы (ПТС) 204—209
Термоэлектродные материалы 96—99
— провода 116—119
Трубка Пито 500—502
Трубчатые пружины 369—374
Тягомеры (ТМП) 375
— сильфонные 387, 389
Тягонапоромеры (ТНМП) 373

У

Упругий чувствительный элемент 363, 365—374
Уравнение расхода 436—438
— — для несжимаемой жидкости 436—438
— — — сжимаемой жидкости 438—440
Уровномер 532, 543, 536, 538, 550—564
— акустический 561—563
— буйковый 548—550
— — устройство 548
— емкостный 550—560
— — устройство 556—560
— измерительная схема 542
— поплавковый 548—550
Усилитель полупроводниковый (УПД) 171, 175
— — (УП-20) 328, 329
— электронный ламповый 171—175
Установка отборных устройств 427, 428
— термоприемников 234—250
— трубных соединений при измерении давления 426
Устройство автоматических уравновешенных мостов 226—228
— измерительное 11
— медных и платиновых термометров сопротивления 197—203
— пирометра ПИТ-1 287
— — фотоэлектрического 283

Ф

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) 47
Ферродинамический преобразователь (ПФ) 314—319

Х

Характеристика амплитудно-фазовая (АФХ) 49
— амплитудно-частотная 47, 50
— комплексная частотная (КЧХ) 49
— фазо-частотная (ФЧХ) 47, 50
Хроматограф газовый 605—621
— «Газохром» 3101 614—617
— устройство 607—611

Ч

Частотный преобразователь 329—332
Числовое выражение погрешности средств измерения 33—37
Чувствительность средств измерений 38
Чувствительный элемент 189, 190, 197—202, 207, 361—374, 409, 583

Э

Электрическая схема потенциометра ПП-63 148—152
Электродвижущая сила (э. д. с.) 87—95
Электроконтактные технические термометры 71—75
Электропневматические преобразователи (ЭПП-М) 338, 339
Электросиловые преобразователи 325—327

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка, формула, таблица	Напечатано	Должно быть
19	12 снизу	$=\Phi(t)$	$=2\Phi(t)$
29	3 и 4 снизу	$X_{1l},\ X_{2l},\ \ldots,\ X_{ml}$	$x_{1l},\ x_{2l},\ \ldots,\ x_{ml}$
41	14 сверху	$y_1=f(x)$ и $y_2=f(y_1)$	$y_1=f_1(x)$ и $y_2=f_2(y_1)$
55	Формула (1-7-6)	$\sum_{i=1}^{n}\left\|\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\right\|\Delta x_i$	$\sum_{i=1}^{n}\left\|\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\right\|\delta x_i$
55	Формула (1-7-8)	$\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\Delta x_i\right)^2}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\delta x_i\right)^2}$
125	12 снизу	$\alpha=0{,}98\%$	$\alpha_{м}=0{,}98\%$ на 10°С
209	3 снизу	точек a и c	точек a и c равны,
209	3 снизу	приборе, равны нулю.	приборе равен нулю.
235	Формула (6-2-2)	$\varepsilon_{пр}\sigma_0 F$	$\varepsilon_{пр}C_0 F$
235	11 сверху	σ_0 — константа излучения	C_0 — константа излучения
235	12 сверху	σ_0	$C_0\cdot 10^{-8}=\sigma_0$
235	23 сверху	$C=\sigma_0\varepsilon_т$	$C=C_0\varepsilon_т$
236	Формула (6-2-5)	$\frac{\sigma_0\varepsilon_{пр}}{\alpha}$	$\frac{C_0\varepsilon_{пр}}{\alpha}$
236	Формула (6-2-6)	$\frac{\sigma_0\varepsilon_{пэ}}{2\alpha_э}$	$\frac{C_0\varepsilon_{пэ}}{2\alpha_э}$
239	5 снизу	Вт/(м$^2\cdot$К)	Вт/(м$\cdot$К)
239	Формула (6-3-2)	$\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_м\delta}}$	$\sqrt{\frac{\alpha d}{\lambda_м\delta d_c}}$
239	8 снизу	d — наружный	d_c — средний
239	4 снизу	$f\approx\pi d\delta.$	$f=\pi d_c\delta,$
240	13 сверху	$m=\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_м\delta}}$	$m=\sqrt{\frac{\alpha d}{\lambda_м\delta d_c}}$
242	Формула (6-3-8)	$\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{м1}\delta_1}};\ \sqrt{\frac{\alpha_2}{\lambda_{м2}\delta_2}};$	$\sqrt{\frac{\alpha_1 d}{\lambda_{м1}\delta_1 d_{c1}}};$ $\sqrt{\frac{\alpha_2 d}{\lambda_{м2}\delta_2 d_{c2}}};$
268	5 сверху	$\frac{c_1'\lambda^{-5}e^{-c_2/\lambda_1 T_п}}{c_2'\lambda_2^{-5}e^{-c_2/\lambda_2 T_п}}=\frac{\varepsilon_{\lambda 1}c_1'\lambda_2^{-5}e^{-c_2/\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda 2}c_1'\lambda_2^{-5}e^{-c_2/\lambda_2 T}}.$	$\frac{c'\lambda_1^{-5}e^{-c_2/\lambda_1 T_п}}{c_2'\lambda_2^{-5}e^{-c_2'/\lambda_2 T_п}}=\frac{\varepsilon\lambda_1 c_1'\lambda_1^{-5}e^{-c_2/\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda 2}c_1'\lambda_2^{-5}e^{-c_2/\lambda_2 T}}.$
286	19 и 20 сверху	, где λ_i^0 и λ_i	, где λ_i^0 и λ_j^0
447	Формула (14-3-5)	$\rho_{с.ч}$	$\rho_{с.г}$
588	Таблица 21-4-1	$x\cdot 10^{10}$	$\varkappa\cdot 10^{10}$

В. П. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

ТРЕТЬЕ ИЗДАНИЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов»

МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

Третье издание учебника по курсу «Теплотехнические измерения и приборы» предназначено для студентов, обучающихся по специальности № 0649 «Автоматизация теплоэнергетических процессов».

В третье издание, полностью переработанное, введены дополнения и изменения, отразившие современные научно-технические достижения в области теплотехнических измерений. Содержание учебника соответствует утвержденной Минвузом СССР программе курса «Теплотехнические измерения и приборы». В книге применены единицы измерения физических величин Международной системы (СИ).

Излагаемые в учебнике теоретические основы методов измерения физических величин и материалы о перспективных средствах измерений ГСП сопровождаются примерами расчетов, что облегчает усвоение курса студентами. В книге освещается методика измерения температур, давления, расхода жидкости, газа и пара и других величин. Рассматриваются методы оценки погрешностей результатов измерений при существующем в настоящее время способе нормирования метрологических характеристик средств измерений.

Приведенные в учебнике примеры расчетов и приложения к главам могут быть использованы при проведении практических занятий, выполнении типовых расчетных заданий, учебных исследовательских работ, курсовых и дипломных проектов, а также при выполнении лабораторных работ.

Книга может быть использована как учебное пособие при изучении теплотехнических измерений и приборов студентами теплоэнергетических специальностей № 0305, 0306, 0308, 0310.

Автор надеется, что это издание книги, как и предыдущие, будет полезно широкому кругу инженеров и научных работников, имеющих дело с теплотехническими измерениями.

Настоящий учебник написан на основе курса «Теплотехнические измерения и приборы», читаемого автором в течение многих лет в Московском ордена Ленина энергетическом институте (МЭИ).

При написании учебника использованы результаты опубликованных научно-исследовательских работ, выполненных непосредственно автором и сотрудниками кафедры АСУ ТП МЭИ под его руководством.

Автор выражает искреннюю признательность к. т. н. доц. М. А. Панько за редактирование книги и рецензентам: заведующему кафедрой автоматизации теплоэнергетических процессов Одесского политехнического института к. т. н. доц. Ю. К. Тодорцеву, к. т. н. доц. Г. Е. Муратову и В. С. Полоник за ценные замечания и предложения, которые автор в основном учел при подготовке учебника к печати.

Автор считает долгом выразить благодарность к. т. н. доц. Н. Д. Кузнецову за замечания и предложения по рукописи и инж. Э. И. Сасалю, А. Н. Забелину и другим сотрудникам кафедры АСУ ТП МЭИ за помощь в оформлении книги.

Все замечания и предложения по книге просьба направлять в издательство «Энергия» по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими показателями современного научно-технического прогресса являются значительная интенсификация технологических процессов, рост единичной мощности и производительности агрегатов и тесно связанное с ними развитие технических средств и техники управления.

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами требуют значительного количества и разнообразия средств измерений, обеспечивающих выработку сигналов измерительной информации в форме, удобной для дистанционной передачи, сбора, дальнейшего преобразования, обработки и представления ее.

Измерения, как один из способов познания природы, способствуют новым научно-техническим открытиям и их внедрению в производство и обеспечивают объективный контроль за технологическими процессами, надежность работы оборудования и экономичность производства. Энергетика, металлургическое и химическое производство, равно как и другие отрасли промышленности, немыслимы без применения современных средств измерений. Особо важное значение приобретает контроль за технологическими процессами в решении проблемы повышения качества продукции и эффективности производства.

Задачи, поставленные XXV съездом КПСС в этом направлении, требуют дальнейшего развития и внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и производством (АСУП) с широким использованием различных методов и современных средств измерений. Можно без преувеличения сказать, что в целом ряде случаев эффективность производства и качество продукции зависят от достоверности и своевременности полученной измерительной информации о ходе технологического процесса. Не менее важна роль контроля в деле обеспечения безопасности ряда производств, таких, например, как тепловые и атомные электростанции, для которых характерным является быстрое протекание процессов при высоком давлении и температуре, а также наличие установок и агрегатов высокой и сверхвысокой единичной мощности.

Отечественная промышленность обеспечивает народное хозяйство страны большим арсеналом средств измерений — от простейших первичных приборов и преобразователей (например, приборы давления, термоэлектрические термометры) до сложных многото-

чечных автоматических измерительных приборов для записи контролируемых величин. Средства измерений Государственной системы приборов (ГСП) позволяют организовать контроль технологических процессов как простых установок, так и сложных производств с применением для контроля информационно-вычислительной техники.

Наличие разнообразных средств измерений требует правильного их выбора для определенных целей. Все более широкое использование электронно-вычислительных машин (ЭВМ) для решения информационных задач в АСУ ТП и для расчета технико-экономических показателей работы оборудования предопределяет применение таких методов и средств измерений, которые в конкретных условиях эксплуатации обеспечили бы необходимую точность. Одним из важных вопросов создания АСУ является разработка их метрологического обеспечения, позволяющего производить правильный выбор необходимых средств измерений и оценку точности измерительных систем. Игнорирование этих факторов может привести к неправильным выводам и экономически не оправданным решениям.

Используемые в настоящее время на практике методы оценки точности теплотехнических измерений базируются на метрологических характеристиках средств измерений, нормированных в виде пределов допускаемых основной и дополнительных погрешностей. Это не позволяет с необходимой достоверностью оценивать погрешности теплотехнических измерений при помощи выпускаемых в настоящее время средств измерений.

Предусмотренный ГОСТ 8.009-72* переход к новой системе нормирования метрологических характеристик средств измерений требует разработки стандартов на отдельные виды средств измерений с целью установления комплекса метрологических характеристик в зависимости от специфики и назначения этих средств измерений [104].

Исследованию метрологических характеристик ряда средств измерений с использованием вероятностно-статистических методов посвящены научно-исследовательские работы, выполненные сотрудниками кафедры АСУ ТП МЭИ под руководством автора [103].

Исследования показали, что внедрение стандартов (ГОСТ 8.009-72*, ГОСТ 8.011-72) на новую систему нормирования метрологических характеристик позволит с необходимой достоверностью оценивать погрешности теплотехнических измерений и будет способствовать решению проблемы метрологического обеспечения информационной части АСУ ТП.

Дальнейшее развитие научных исследований и техническая модернизация производства ставят новые задачи перед техникой теплотехнических измерений. В первую очередь требуются дальнейшее совершенствование методов и средств измерений, повышение их качества, надежности и ремонтопригодности, создание новых средств измерения, обеспечивающих нужды народного хозяйства страны в области теплотехнических измерений.